



TAMPEREEN TEKNILLINEN YLIOPISTO
TAMPERE UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

PASI PURANEN
OSITTAISPURKAUKSET HAKKURITEHOLÄHTEEN MUUNTAJAN
ERISTYSRAKENTEESSE
Diplomityö

Tarkastaja: tutkijatohtori Pertti
Pakonen
Tarkastaja ja aihe hyväksytty
Tieto- ja sähkötekniikan
tiedekuntaneuvoston kokouksessa
5. maaliskuuta 2014

TIIVISTELMÄ

TAMPEREEN TEKNILLINEN YLIOPISTO

Sähkötekniikan koulutusohjelma

Puranen, Pasi: Osittaispurkaukset hakkuriteholähteen muuntajan eristysrakenteessa

Diplomityö, 66 sivua, 4 liitesivua

Elokuu 2014

Pääaine: Sähkökäyttöjen tehoelektroniikka

Tarkastaja: tutkijatohtori Pertti Pakonen

Avainsanat: Osittaispurkaus, eristysrakenne, flyback-hakkuri, tehoelektroniikkamuuntaja, flyback-muuntaja

Hakkuriteholähde on sähköinen laite, joka muuttaa tasajännitteen arvoa joko suuremmaksi tai pienemmäksi. Tässä työssä tutkittiin flyback-hakkurin muuntajan eristysrakenteessa osittaispurkaustestin aikana esiintyvien osittaispurkauksien syttymis- ja sammumisjännitteitä. Työssä oli tarkoituksena löytää flyback-muuntajalle soveltuva eristysrakenneratkaisu, jolla on suuri osittaispurkauksien syttymis- ja sammumisjännite.

Teoriaosuuksien pohjalta käsiteltävälle flyback-muuntajalle valittiin käämintäkonfiguraatio sekä eristekerroksien paksuudet, jonka jälkeen muuntajalle tehtiin kaksiulotteinen simulointimalli Ansysin Maxwell 2014 ohjelmalla. Simulointien avulla tutkittiin mahdollisia eristysrakenneratkaisuja muuntajalle. Valitussa muuntajan käämintäkonfiguraatiossa huomattiin olevan mahdollista, että eristysrakenteessa voi esiintyä muuntajan ensiökäämien ja toisiokäämin välillä niin sanottuja käämien leikkauskohtia, joissa käämien välille jää eristeeksi johdinten pinnalla olevan eristeen lisäksi ainoastaan ilmaa tai pahimmassa tapauksessa käämit pystyivät koskettamaan toisiaan kiinteän eristeen puuttuessa johdinten välistä. Käämien leikkauskohtien arveltiin olevan osittaispurkauksien syttymiskohta ensiö- ja toisiokäämien välisissä mittauksissa, minkä perusteella simulointiin mahdollisia lisäeristeratkaisuja käämien leikkauskohtaan.

Simulointitulosten perusteella valmistettiin erilaisilla eristysrakenteilla olevia muuntajaprototyyppisiä, joille suoritettiin osittaispurkaustesti. Mittaustulokset tukivat pääosin hyvin sitä oletusta, että osittaispurkaukset syttyisivät ensiökäämien ja toisiokäämin välisissä leikkauskohdissa. Testatuissa muuntajissa sammumisjännitteet eivät nousseet kuitenkaan odotetun paljon muuntajilla, joissa oli käytetty ensiökäämien ja toisiokäämin välisissä leikkauskohdissa kiinteää eristettä verrattuna niihin muuntajiin, joissa kiinteitä eristeitä ei ollut käytetty leikkauskohdissa. Tämä saattoi johtua muuntajissa käytetyn lakan huonosta tunkeutumisesta eristysrakenteeseen.

Mitatuissa muuntajissa, joissa oli käytetty Mylar-kalvoa eristeenä, oli keskimäärin suurempi sammumisjännite kuin muilla eristysrakenneratkaisulla. Tämä johtui todennäköisesti lakan hyvästä tunkeutumisesta eristysrakenteeseen. Flyback-muuntajan eristysrakenteen osittaispurkauksien syttymis- ja sammumisjännitettä voidaan edelleen pyrkiä kasvattamaan parantamalla lakan tunkeutumista eristysrakenteeseen. Lakan tunkeutuminen eristysrakenteeseen voi parantua esimerkiksi korvaamalla muuntajien lakkaan kastaminen tyhjiössä tapahtuvaan lakalla kyllästämiseen.

ABSTRACT

TAMPERE UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

Degree Programme in Electrical Engineering

Puranen, Pasi: Partial discharges in insulation structure of switched-mode power supply transformer

Master of Science Thesis, 66 pages, 4 Appendix pages

August 2014

Major: Power Electronics of Electrical Drives

Examiner: Postdoctoral Researcher Pertti Pakonen

Keywords: Partial discharge, insulation structure, flyback converter, power electronic transformer, flyback transformer

The switching power supply is an electrical device that either lowers or increases the DC voltage value. This study explores the inception and extinction voltages of partial discharges which occur in the insulation structure of a flyback converter transformer during a partial discharge test. The goal of this study was to find a flyback transformer insulation structure solution that would have high partial discharge inception and extinction voltages.

An appropriate coil configuration and insulation layer thickness for the flyback transformer was chosen based on theoretical parts of the study. After this, a two-dimensional simulation model of the transformer was made using the Ansys Maxwell 2014 software. Simulation results were used to find out possible insulation structure solutions for the transformer. It was discovered that with the chosen coil configuration so called intersection points could appear between the primary and secondary windings. Apart from the insulation on the surface of the conductors, there is no solid insulation between the windings in these intersection points, and in the worst case scenario the windings are even able to touch each other due to the absence of solid insulation.

The assumption made from this was that the intersection points of the windings would be the locations in the insulation structure where first partial discharges ignite. Based on that assumption more simulations were conducted with additional insulation between the windings in these intersection points. Based on the simulation results, transformer prototypes with different insulation structures were manufactured and partial discharge tests were carried out on these transformers. The test results mainly supported the hypothesis that the partial discharges ignite at the intersection points between primary and secondary windings.

However, when testing transformer prototypes that had an insulation structure composed of solid insulation between the primary and secondary windings in the intersection points, the extinction voltages didn't increase as much as expected, when compared to those transformers that didn't have this additional solid insulation. This could be as a result of the varnish used in the transformers impregnating poorly into the insulation structure.

The measured transformers, which used Mylar-film in the insulation structure, had on average a higher extinction voltage than transformers with other kinds of insulation structures. This was probably due to the good impregnation of the varnish to the insulation structure. Partial discharge inception and extinction voltages in the flyback-transformer insulation structure may be further increased by improving the impregnation of the varnish to the insulation structure. This could be achieved for example by changing the transformer varnish dip coating to a vacuum pressure impregnation.

ALKUSANAT

Tämä diplomityö on tehty Helsingissä ABB Oy Drivesilla. Työn ohjaajana toimi ABB Oy:n osalta tekniikan tohtori Jari Leppäaho, jota haluan kiittää hyvistä ohjeista ja neuvoista työn aikana. Työn tarkastajana toimi Tampereen teknilliseltä yliopistolta tutkijatohtori Pertti Pakonen, jota haluan kiittää työn tarkastamisesta sekä hyvistä kommentteista ja ohjeista työhön liittyen.

Haluan kiittää myös Henri Kinnusta ja Mika Mastia simulointityökalujen käytön opettamisesta sekä muista työhön liittyvistä neuvoista. Lisäksi haluan kiittää koko ABB Oy Drivesin tuotekehitysosaston henkilökuntaa viihtyisästä työympäristöstä sekä saamistani neuvoista.

Helsingissä 21.8.2014

Pasi Puranen

SISÄLLYS

1	Johdanto	1
2	Taajuusmuuttajan apusähköjärjestelmä	3
2.1	Taajuusmuuttajan rakenne	3
2.2	Hakkuriteholähdetyypit	8
2.3	Flyback-hakkurin toiminta	11
2.4	Suojaerotusväleille standardeissa määritellyt vaatimukset	19
3	Sähkökentän vaikutus eristeeseen	21
3.1	Kaasujen läpilyönti	24
3.2	Paschenin laki	26
3.3	Streamer-purkaus	27
4	Osittaispurkaukset	28
4.1	Osittaispurkausilmiöt	28
4.1.1	Sisäiset osittaispurkaukset	28
4.1.2	Pintapurkaukset	33
4.1.3	Koronapurkaukset	34
4.2	Osittaispurkaussuureet	35
4.3	Eristeiden vaurioituminen osittaispurkausten vaikutuksesta	36
4.4	Osittaispurkauksien mittaaminen	37
4.4.1	Osittaispurkausten sähköinen mittaus	38
4.4.2	Osittaispurkausten ei-sähköinen havaitseminen	41
5	Flyback-muuttajan rakenne ja valmistusmateriaalit	43
5.1	Johtimet	45
5.2	Eristemateriaalit	47
6	Muuttajan sähkökentälaskenta	49
7	Osittaispurkausmittaukset laboratoriossa	56
7.1	Mitattujen muuttajien eristysrakenteet	58
7.2	Osittaispurkauksien sammumisjännite käämivälillä N1-N3	59
7.3	Osittaispurkauksien sammumisjännite käämivälillä N2-N3	61
7.4	Osittaispurkauksien sammumisjännite käämivälillä N4-N3	63
7.5	Osittaispurkauksien sammumisjännitteiden keskiarvot	64
8	Yhteenveto	65
	Lähteet	67
	Liite A: Furukawan TEX-E johtimen mitat eri johtimen halkaisijoille	70
	Liite B: Furukawan TEX-ELZ johtimen mitat eri johtimen halkaisijoille	71
	Liite C: Lakatun kuparijohtimen eristerokoksen paksuus eri johtimen halkaisijoille ...	72

LYHENTEET JA MERKINNÄT

α	Townsendin ensimmäinen ionisaatiokerroin
α_1	Sähkövuon tulokulma kohtisuoraan eristeiden rajapintaan nähden
α_2	Sähkövuon lähtökulma kohtisuoraan eristeiden rajapintaan nähden
ε	Permittiviteetti
ε_0	Tyhjön permittiviteetti
ε_r	Suhteellinen permittiviteetti
γ	Sekundäärinen ionisaatiokerroin
A	Kaasulle ominainen vakio
B	Kaasulle ominainen vakio
C	Kapasitanssi
C_a	Eristysrakenteen kapasitanssi
C_b	Kaasuontelon kanssa sarjassa oleva eristyksen kapasitanssi
C_c	Kaasuontelon kapasitanssi
d	Elektrodivälin pituus
D	Pulssisuhde
\bar{D}	Sähkövuon tiheys
\bar{E}	Sähkökentän voimakkuus
i	Anodille tulevien elektronien aiheuttama virta
i_0	Katodilta liikkeelle lähteneiden elektrodien aiheuttama virta
I_{out}	Hakkurin ulostulovirta
I_p	Muuntajan ensiökäämin virran huippuarvo
I_{pmin}	Muuntajan ensiökäämin virran minimiarvo jatkuvan johtamisen tilassa
I_{pri}	Muuntajan ensiökäämissä kulkeva virta
I_{sec}	Muuntajan toisiokäämissä kulkeva virta
N_1	Ensiökäämin kierrostenlukumäärä
N_2	Toisiokäämin kierrostenlukumäärä
p	Paine
$p.u.$	Nimellisarvo
q_0	Kalibrointigeneraattorin aiheuttaman pulssin näennäisvaraus
U_b	Läpilyöntijännite
U_{bmin}	Läpilyöntijännitteen minimiarvo
U_e	Sammumisjännite
U_{DC}	Tasajännitteen keskiarvo
U_i	Syttymisjännite
U_{in}	Hakkurin sisääntulojännite
U_{LL}	Pääjännitteen tehollisarvo

U_{out}	Hakkurin ulostulojännite
U_{PD}	Toistuva huippujännite erotusvälin ylitse
t_{off1}	Ei-johtavan tilan kesto aika
t_{off2}	Ei-johtavan tilan kestoajan osuus, kun muuntajan magneettikenttään varastoitunut energia on käytetty kokonaan
t_{on}	Johtavan tilan kesto aika
T_s	Kytkenäjakson pituus
V_{CC}	PWM-ohjauslohkon käyttöjännite
Clamp-piiri	Hajainduktanssista johtuvia jännitepiikkejä vaimentava piiri.
EMI	Sähkömagneettinen häiriö. Tulee sanoista electromagnetic interference
Jättämä	Jättämä kertoo kuinka monta prosenttia epätahtikoneen roottorin pyörimisnopeus on staattorikäämitysten aiheuttamaa pyörivän magneettikentän pyörimisnopeutta, niin kutsuttua tahtinopeutta, hitaampi.
Kommutointi	Flyback-hakkurin muuntajan yhteydessä kommutoinnilla tarkoitetaan tilannetta, jossa virta kulkee sekä muuntajan ensiö- että toisiopuolella hajainduktanssista johtuen.
Napapariluku	Napapariluku kuvaa sähkökoneessa olevien magneettisten napojen määrää. Yksi käämivyyhti synnyttää magneettisen pohjois- ja etelänavan. Napapariluku on magneettisten napojen lukumäärä jaettuna kahdella.
Näennäisvaraus	Se varausmäärä, joka eristysrakenteeseen tuotuna aiheuttaa yhtä suuren jännitteen muutoksen eristysrakenteen liittimissä kuin osittaispurkaus.
Näytetesti	Testi, joka suoritetaan sattumanvaraisesti erästä poimitulle laitteelle.
Osittaispurkaus	Sähköinen purkaus, joka ei yhdistä elektrodeja toisiinsa.
Pulssisuhde	Kytkenä johtamisajan suhde kytkenäjakson pituuteen.
Rutiinitesti	Testi, joka suoritetaan jokaiselle laitteelle valmistuksen jälkeen, jotta voidaan varmistua, että laite täyttää tietyt sille asetetut kriteerit.
Sammumisjännite	Sammumisjännitteellä tarkoitetaan sitä eristysrakenteen yli vaikuttavaa jännitettä, jolla tietyn suuruisia tai suurempia osittaispurkauksia ei enää esiinny jännitettä pienennettäessä.
Suojaerotusväli	Toiminnallisen erotuksen lisäksi eristys suojaa myös sähköiskuilta.

Syttymisjännite	Syttymisjännitteellä tarkoitetaan sitä eristysrakenteen yli vaikuttavaa jännitettä, jolla tietyn suuruisia tai suurempia toistuvia osittaispurkauksia havaitaan ensimmäisen kerran, kun jännitettä vähitellen nostetaan.
Toiminnallinen erotus	Sähköä johtavien osien välinen eristys, joka on välttämätön piirin oikeanlaiselle toiminnalle, mutta ei tarjoa suojaa sähköiskulta.
Tyypitesti	Testi, jossa testataan yksi tai useampi laite, jotka on tehty tietyllä suunnitteluratkaisulla, että ne täyttävät niille asetetut vaatimukset.
Vapaa elektroni	Elektroni, joka voi liikkua vapaasti atomista toiseen.
Välipiiri	Taajuusmuuttajan tasasuuntaajasillan sekä vaihtosuuntaajasillan välissä oleva pääpiirin osa.
Yliaalto	Epälineaarisen kuorman aiheuttama vaihtovirran särökomponentti, joka on sinimuotoinen ja sen taajuus on vaihtojännitteen perustaajuuden kerrannainen.

1 JOHDANTO

Hakkuriteholähde on sähköinen laite, joka muuttaa tasajännitteen arvoa joko suuremmaksi tai pienemmäksi. Hakkureita on erityyppisiä, joista voidaan valita kuhunkin tilanteeseen sopivat ominaisuudet omaava hakkurityyppi. Tässä työssä käsitellään pääasiassa flyback-tyyppistä hakkuria sekä flyback-hakkurin toiminnan kannalta olennaisen muuntajan eristysrakennetta. Ennen flyback-hakkuria käsitellään lyhyesti muutama yleinen hakkurityyppi, jotta hakkuriteholähteiden toiminta tulisi lukijalle paremmin tutuksi.

Työssä käsiteltävällä flyback-hakkuriteholähteellä syötetään taajuusmuuttajan oheiselektroniikkaa, joka tarvitsee toimiakseen joitakin kymmeniä voltteja. Koska tarvittavat jännitetasot muutetaan hakkuriteholähteen avulla taajuusmuuttajan välipiiristä, jossa jännite voi olla useita satoja voltteja, muodostuu hakkuriteholähteen muuntajan yli suuri potentiaaliero. Suuri potentiaaliero pienen muuntajan ensiö- ja toisiokäämin välillä aiheuttaa suuria sähkökentän voimakkuuksia muuntajan eristysrakenteessa, jolloin osittaispurkauksien mahdollisuus kasvaa. Kytkenässä muuntaja muodostaa galvaanisen erotuksen taajuusmuuttajan välipiirin ja oheiselektroniikan välille. Muodostunut erotusväli voi olla joko *toiminnallinen erotus* tai *suojaerotus*. Toiminnallinen erotus on sähköä johtavien osien välinen eristys, joka on välttämätön piirin oikeanlaiselle toiminnalle. Suojaerotus tarjoaa, toiminnallisen erotuksen lisäksi, myös suojaa sähköiskua vastaan. [1]

Taajuusmuuttajiin sovellettava standardi IEC 61800-5-1 määrittelee, että suojaerotetulle eristysrakenteelle on tehtävä osittaispurkaustesti, mikäli jännite eristysrakenteen yli on vähintään 750 V ja jänniterasitus on vähintään 1 kV/mm [1, s. 41]. Standardin mukaan testi voidaan sivuuttaa, mikäli eristysrakenteessa käytetään materiaaleja, jotka eivät vaurioidu osittaispurkauksien vaikutuksesta, eikä osittaispurkauksien vaikutuksesta aiheudu siten läpilyöntiä eristysrakenteen yli. Tällaisia materiaaleja ovat esimerkiksi keraamit. Käytännössä tällaisten materiaalien käyttö hakkuriteholähteen muuntajassa ei ole kustannustehokasta tai niiden käyttäminen muuntajassa on hankalaa, joten suurimmassa osassa tapauksista osittaispurkaustesti tulee suorittaa. Muuntajan eristysrakenteessa käytetään tavallisesti erilaisia polymeerieristeitä, joita osittaispurkaukset vahingoittavat. Polymeerieristeillä toteutetun muuntajan eristysrakenteessa tapahtuu ennen pitkään läpilyönti, mikäli siinä esiintyy säännöllisiä osittaispurkauksia. Läpilyönti voi tapahtua hyvinkin nopeasti, mikäli osittaispurkausten määrä on suuri.

Monissa hakkuriteholähdesovelluksissa ei esiinny kovin isoja jännitteitä, tyypillisesti enemmillään muutaman sadan voltin luokkaa, muuntajan eristysrakenteen ylitse. Tästä johtuen jänniterasitus eristysrakenteessa jää useissa tapauksissa niin pieneksi, ettei osittaispurkauksien syntymistä eristysrakenteessa tarvitse tutkia. Tämän vuoksi osittaispurkauksien syntymisestä hakkuriteholähteen muuntajassa ei ole saatavissa

niin kattavasti kirjallisuutta tai tieteellisiä julkaisuja kuin esimerkiksi jakeluverkon muuntajassa tapahtuvista osittaispurkauksista. Tämän työn tarkoitus on muodostaa lukijalle käsitys osittaispurkauksien syntymisestä hakkuriteholähteen muuntajan eristysrakenteessa sekä esittää eristysrakennieratkaisuja, joilla on mahdollisimman suuret osittaispurkauksien *syttymis-* ja *sammumisjännitteet*. Sopivia eristysrakennieratkaisuja pyrittiin löytämään muuntajan rakenteelle tehtävien sähkökenttäsimulointien avulla. Simulointien perusteella valmistettiin muuntajia erilaisilla eristysrakenteilla ja niille tehtiin osittaispurkaustesti.

Osittaispurkauksia käsitellään yleensä vain keski- tai suurjännitesovellusten yhteydessä. Työn lukijan oletetaan olevan pääasiassa tekemisissä hakkuriteholähteiden tai muiden pienjännitesovellusten kanssa, joiden suunnittelussa ei yleensä tarvita syvempää tietämystä osittaispurkauksista ilmiönä. Tämän vuoksi työssä käsitellään osittaispurkauksien teoriaa ja niiden mittaamista hieman laajemmin kuin työn ymmärtämisen kannalta olisi välttämätöntä, koska työn tarkoitus on tehdä lukijalle osittaispurkaus ilmiönä tutuksi myös yleisemmällä tasolla.

2 TAAJUUSMUUTTAJAN APUSÄHKÖJÄRJESTELMÄ

Taajuusmuuttajan apusähköjärjestelmään katsotaan kuuluvan taajuusmuuttajan toiminnan kannalta tärkeät sähköjärjestelmät, joiden kautta ei syötetä taajuusmuuttajan varsinaista kuormaa. Apusähköjärjestelmän kautta syötetään muun muassa taajuusmuuttajan toiminnan kannalta olennaista elektroniikkaa ja puhaltimia, jotka vaativat yleensä huomattavasti pienemmät jännitteet kuin mitä taajuusmuuttajan pääpiirissä vallitsee.

Luvussa 2.1 käsitellään taajuusmuuttajan yleistä toimintaperiaatetta, jotta lukijalle muodostuu käsitys yleisellä tasolla taajuusmuuttajan osakokonaisuuksista, jolloin myös taajuusmuuttajan apusähköjärjestelmien toiminnan hahmottaminen muodostuu selkeämmäksi. Luvussa 2.2 käsitellään hakkurien toimintaa ja peruseräperiaatteita. Luvussa 2.3 käsitellään flyback-hakkuritopologiaa, koska työssä jäljempänä keskitytään pääasiassa käsittelemään flyback-hakkurin muuntajan eristysrakennetta. Luvussa 2.4 käsitellään työn kannalta olennaisia standardeja.

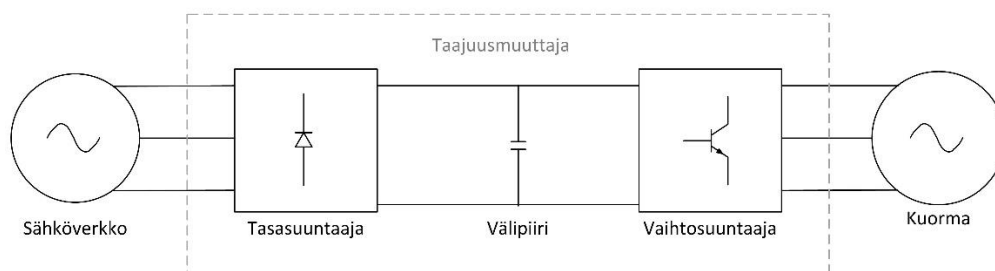
2.1 Taajuusmuuttajan rakenne

Vaihtosähkömoottorin roottorin pyörimisnopeuden määrää pääasiassa moottorin *napapariluku* sekä syöttävän vaihtosähköverkon taajuus. Moottorin napapariluku riippuu moottorin staattorin kääminnästä, joten napapariluku ei ole vaihdettavissa moottorin rakentamisen jälkeen. Joissakin tapauksissa moottorin staattoriin tehdään useammat käämitykset, jolloin napapariluku voidaan vaihtaa ottamalla eri käämityksiä käyttöön. Tällöin saadaan eri käämityksien lukumäärästä riippuva lukumäärä eri pyörimisnopeuksia. Useampien staattorikäämityksien tekeminen on kuitenkin erittäin kallista, eikä tätä nopeuden säätötapaa nykyisin käytetä kuin erikoistapauksissa. [2]

Moottorin kuormalle välittyvään pyörimisnopeuteen voidaan vaikuttaa myös erilaisilla mekaanisilla vaihteilla, jolloin moottorille saadaan yksi tai useampia kiinteitä pyörimisnopeuksia vaihteen rakenteesta riippuen. Oikosulku- ja liukurengaskoneiden yhteydessä pyörimisnopeutta voidaan muuttaa hieman säätämällä *jättämää*, mutta tällöin roottoripiirin häviöt kasvavat. Jättämä kertoo kuinka monta prosenttia epätahtikoneen roottorin pyörimisnopeus on staattorikäämitysten aiheuttamaa pyörivän magneettikentän pyörimisnopeutta niin kutsuttua tahtinopeutta hitaampi. Yksikään yllä olevasti säätötavoista ei tarjoa laaja-alaista ja portaatonta nopeuden säätöä vaihtosähkömoottoreille. [2]

Sen sijaan vaihtosähkön taajuutta muuttamalla voidaan vaihtosähkömoottoria säätää monipuolisesti. Taajuusmuuttaja on tehoelektroniikkalaite, jolla nimensä mukaisesti voidaan muuttaa vaihtosähkön taajuutta. Ennen taajuusmuuttajien yleistymistä tasasähkömoottorit olivat käytännössä ainoa vaihtoehto tarkkaa ja laaja-alaista pyörimisnopeuden säätöä vaativissa kohteissa. Tasasähkömoottorit ovat kuitenkin kalliita rakentaa sekä vaativat huomattavasti enemmän huoltoa kuin vaihtosähkömoottorit, jotka ovat lähes huoltovapaita. Tästä syystä taajuusmuuttajien yleistyttyä ja halvennettua vaihtosähkömoottorin ja taajuusmuuttajan yhdistelmä on nykyisin korvannut tasasähkömoottorit useissa eri kohteissa.

Taajuusmuuttaja voidaan kuvan 2.1 mukaisesti jakaa tasasuuntaajaan, välipiiriin ja vaihtosuuntaajaan. Vaihtosähkön taajuuden muuttaminen oli ennen ohjattavan tehoelektroniikan kehittymistä haasteellista, koska vaihtosähkön taajuuden muuttaminen tehonsiirrossa portaattomasti ja energiatehokkaasti suoraan toiseksi ei ole mahdollista, vaan vaihtojännite täytyy ensin muuttaa tasajännitteeksi ja sen jälkeen muuttaa vaihtosuuntaajalla takaisin vaihtojännitteeksi halutulla taajuudella. Vaihtosuuntaajan toiminta vaatii sähköisiä kytkimiä, joita voidaan ohjata. Vuonna 1947 keksittiin ensimmäinen kokonaan kiinteistä materiaaleista valmistettu transistori, ja vuonna 1951 keksittiin ensimmäinen bipolaarinen liitost transistori (engl. bipolar junction transistor), jonka toimintaperiaatteella myös nykyiset transistorityypit toimivat [3; 4]. Ensimmäinen tehopuolijohde oli vuonna 1957 General Electricin keksimä tyristori, joka aloitti siirtymisen kiinteistä materiaaleista valmistettuihin tehoelektroniikkapiireihin [3]. Ennen vuotta 1948 sähköisenä kytkimenä käytettiin elektroniputkia, joiden toiminta perustuu elektronien kulkuun tyhjiössä tai kaasussa.



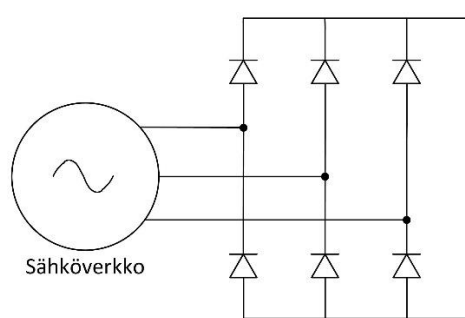
Kuva 2.1. Taajuusmuuttaja.

Ensimmäisenä sähköverkosta päin katsottaessa taajuusmuuttajassa on tasasuuntaaja, joka muuttaa sähköverkosta saatavan vaihtojännitteen tasajännitteeksi tasasuuntaussillan avulla. Kuvassa 2.2 on esitetty diodeilla toteutettu kolmivaihe tasasuuntaussilta. Tasasuuntaussilta muodostaa vaihtojännitteestä tasajännitettä, jonka huippuarvo on kolmevaiheisen tasasuuntaussillan yhteydessä vaihtojännitteen pääjännitteen huippuarvon suuruinen. Muodostunut tasajännite ei kuitenkaan ole kuitenkaan koko ajan pääjännitteen huippuarvon suuruinen, vaan tasajännite aaltoilee hieman (engl. ripple). Kolmivaihetasasuuntaajan muodostaman tasajännitteen keskiarvo voidaan laskea yhtälöllä (2.1) [5].

$$U_{DC} = \frac{3}{\pi} \cdot \sqrt{2} \cdot U_{LL} \approx 1,35 \cdot U_{LL} \quad (2.1)$$

Yhtälössä U_{LL} tarkoittaa pääjännitteen tehollisarvoa. Pääjännite on kahden vaihejännitteen välinen arvo kolmivaiheisessa sähköverkossa.

Aaltoileva tasajännite on kuitenkin laitteen käytön kannalta ongelmallista, koska tasajännitteen arvo vaihtelee paljon ja pienikin häiriö sähkönsyötössä aiheuttaa laitteen vikalaukaisun alijännitteeseen. Tätä vaihtelua pienennetään sijoittamalla kuvassa 2.1 mainittuun välipiiriin kondensaattori, jolloin tasajännitteen aaltoilu muodostuu riittävän pieneksi. Tällöin puhutaan jännitevälipiirillisestä taajuusmuuttajasta. Tasasuuntaussillan tuottama energia on mahdollista varastoida myös välipiiriin sijoitettuihin keloihin, jolloin puhutaan virtavälipiirillisestä taajuusmuuttajasta. Tällöin laitteen välipiirin virta pyritään pitämään tasaisena jännitteen sijasta. Virtavälipiirillistä taajuusmuuttajaa ei käsitellä tässä työssä tarkemmin.



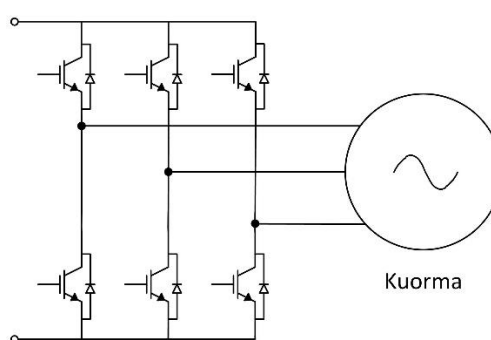
Kuva 2.2. Diodeilla toteutettu tasasuuntaussilta.

Välipiirin kondensaattorin vuoksi taajuusmuuttajaa ei voida tavallisesti kytkeä suoraan sähköverkkoon, koska kondensaattorin latautumisesta muodostuva syöksyvirtapulssi muodostuisi niin isoksi, että taajuusmuuttaja tai sähköverkon komponentit voisivat vaurioitua. Eräs tapa suorittaa välipiirin lataus on kytkeä laite sähköverkkoon ensin latausvastuksien kautta, jotka ovat kytketty laitteen normaalin syötön rinnalle ennen tasasuuntaussiltaa. Latausvastukset voidaan kytkeä myös suoraan välipiiriin, jolloin vastuksien kanssa sarjaan pitää kytkeä diodit.

Tasasuuntaussilta voidaan toteuttaa myös tyristoreilla, jolloin välipiirin lataus voidaan suorittaa tyristorin sytykskulmaa muuttamalla. Tyristori on diodin kaltainen puolijohdekomponentti, joka voidaan liipaista johtavaan tilaan sytytyspulssilla ja jotkin tyristorit voidaan viedä johtamattomaan tilaan sytytyspulssin kanssa käänteisellä polariteetilla olevalla pulssilla. Tyristoreilla toteutetulla tasasuuntaussillalla välipiirin jännite voidaan muodostaa myös normaalia, sähköverkon pääjännitteen huippuarvon määräämää, tasajännitettä pienemmäksi muuttamalla tyristorien sytykskulmaa nolasta poikkeavaksi. Tällöin taajuusmuuttajan sähköverkosta ottamat virtapulssit muodostuvat kuitenkin todella isoiksi, jos taajuusmuuttaja on raskaasti kuormitettu. Taajuusmuuttajan sähköverkosta ottamat virtapulssit aiheuttavat *yliaaltoja* sähköverkkoon, mikä aiheuttaa sähkönlaadun heikkenemistä. Yliaaltoja pienennetään sijoittamalla suodattimia

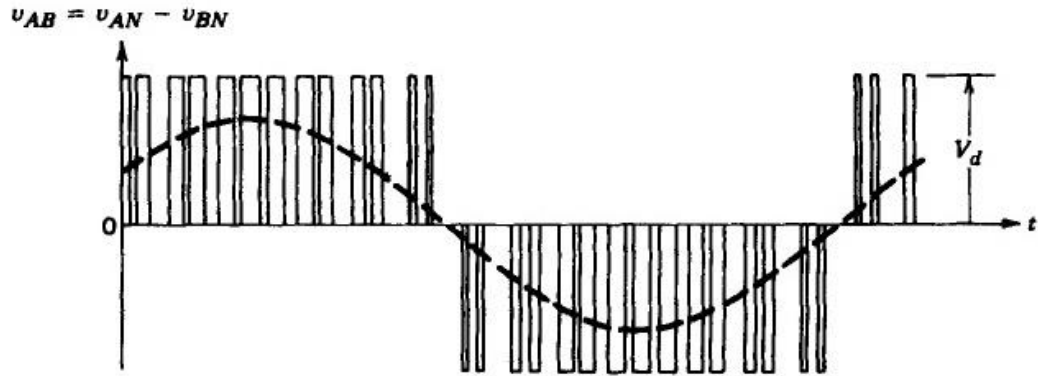
sähköverkon ja tasasuuntaussillan väliin. Kolmas vaihtoehto tasasuuntaussillan puolijohdekomponenteiksi ovat transistorit, jolloin taajuusmuuttajan välipiirissä oleva energia voidaan syöttää takaisin sähköverkkoon taajuusmuuttajaan kytketyn moottorin jarruttamisen yhteydessä. [5; 6]

Kuvassa 2.3 on esitetty vaihtosuuntaajan eli invertterin vaihtosuuntaussilta, joka on toteutettu IGBT-transistoreilla. Nykyisin transistoreiden käyttäminen vaihtosuuntaajasillassa on käytännössä välttämätöntä riittävän ohjattavuuden aikaansaamiseksi. Vaihtosuuntaajasilta muodostaa välipiirin tasajännitteestä vaihtojännitettä halutulla taajuudella. Vaihtojännite muodostetaan ohjaamalla sillan transistoreita johtavaan ja johtamattomaan tilaan eri kytkentäkombinaatioiden mukaisesti. Transistoreita käytetään sillassa siis sähköisinä kytkiminä.



Kuva 2.3. IGBT-transistoreilla toteutettu vaihtosuuntaaja.

Kolmivaihesuuntaajassa on kahdeksan eri kytkentäkombinaatiota [6]. Kytkentäkombinaatiotiloja vaihdellaan huomattavasti suuremmalla taajuudella kuin, mikä on haluttu vaihtojännitteen taajuus. Nykyisin taajuusmuuttajissa käytetään vaihtosuuntaajan kytkentätaajuutena joitakin kilohertsejä. Eri kytkentäkombinaatioiden kytkentäajat ja järjestykset sopivasti valitsemalla saadaan keskiarvona tuotettua vaihtojännitettä, jolla on haluttu taajuus ja huippuarvo. Jännitevälipiirillisessä taajuusmuuttajassa muodostuva vaihtojännite on erittäin säröytynyttä, eikä muistuta juurikaan sinimuotoista jännitettä, kuten kuvassa 2.4 on esitetty. Sopivalla suodatuksella moottorin virta on kuitenkin hyvin lähellä sinimuotoista virtaa, jolloin haitalliset virran yliaaltokomponentit eivät muodostu kovin isoksi.



Kuva 2.4. Vaihtosuuntaajan muodostama A- ja B- vaiheiden välinen pääjännite. Katkoviivalla merkitty käyrä on jännitteen keskiarvo [7, s. 227].

Moottorille menevän vaihtojännitteen taajuutta ja jännitteen tehollisarvoa säätämällä voidaan vaikuttaa myös moottorin muihin ominaisuuksiin pyörimisnopeuden lisäksi. Oikosulkumoottori ottaa käynnistäessään huomattavan suuren virran verkosta, mutta taajuusmuuttajalla oikosulkumoottorille menevää jännitteen tehollisarvoa ja taajuutta voidaan lähteä hiljalleen nostamaan nolasta, jolloin moottoria käynnistäessä sähköverkosta otettu huippuvirta käynnistytksen yhteydessä ei muodostu lähellekään niin suureksi. Taajuusmuuttajalla voidaan myös sähköisesti jarruttaa moottoria, jolloin moottorin nopeutta voidaan tarvittaessa myös laskea huomattavasti nopeammin kuin suoraan sähköverkosta syötettäessä.

Taajuusmuuttaja tarjoaa siis paljon erilaisia moottorin säätömahdollisuuksia. Jotta taajuusmuuttajan toimintaa voidaan säätää, tarvitaan taajuusmuuttajassa myös elektroniikkaa muun muassa vaihtosuuntaajan transistoreiden ohjaamiseen tarvittavien hilapulssien muodostamiseen ja laskemiseen. Usein taajuusmuuttaja sisältää myös erilaisia mittauksia ja suojauksia, jotka vaativat toimiakseen elektroniikkaa. Taajuusmuuttajan syöttämä moottori vaatii usein suhteellisen suuret vaihevirrät, jotka voivat olla kymmenistä ampeereista muutamaan tuhanteen ampeeriin. Tällöin myös taajuusmuuttajan tasa- ja vaihtosuuntaajasillan puolijohdekomponenttien läpi kulkee suhteellisen suuret virrat. Suurien virtojen johtaminen puolijohdekomponenttien läpi aiheuttaa suuria tehohäviöitä komponentissa, jolloin komponentit lämpenevät voimakkaasti. Tästä syystä taajuusmuuttajalla pitää olla aina jonkinlainen jäähdytys, etteivät komponentit lämpene liikaa. Myös taajuusmuuttajan oheiselektroniikka ja välipiiriin sijoitetut kondensaattorit lämpenevät taajuusmuuttajan käytön aikana ja vaativat tavallisesti myös jäähdytystä. Tavallisesti taajuusmuuttajan jäähdytys toteutetaan yhdellä tai useammalla puhaltimella, mutta markkinoilla on myös vesijäähdytteisiä taajuusmuuttajia.

Taajuusmuuttajan elektroniikka ja jäähdyttämiseen tarvittava puhallin tarvitsevat tyypillisesti huomattavasti pienemmän jännitteen toimiakseen kuin sähköverkon jännite tai taajuusmuuttajan välipiirissä oleva tasajännite. Tästä syystä taajuusmuuttajassa pitää

olla vähintään yksi teholähde, joka muuttaa saatavissa olevan jännitteen muutaman kymmenen voltin suuruiseksi tasajännitteeksi. Puhaltimia voitaisiin myös syöttää suoraan sähköverkosta, mutta yleensä taajuusmuuttaja suunnitellaan toimimaan useilla eri sähköverkon jännitteillä. Kiinteällä nopeudella pyörivät puhaltimet eivät yleensä toimi useilla eri sähköverkon jännitteillä, joten eri sähköverkon jännitteille pitäisi laitteeseen laittaa erilaiset puhaltimet. Teholähdettä käyttäessä sama puhallin sopii useille eri sähköverkon jännitteille. Tässä työssä keskitytään taajuusmuuttajan välipiiristä syöttönsä ottavien teholähteiden tarkasteluun. Teholähteiden syöttö otetaan yleensä taajuusmuuttajan välipiiristä, jossa on taajuusmuuttajan suurista ulostulotehoista johtuen kuvan 2.1 mukaisesti melko suuren kapasitanssin omaava kondensaattori. Välipiirin kondensaattorin avulla teholähde pysyy toimintakykyisenä hetken aikaa, vaikka sähköverkosta oleva syöttö katkeaisikin, jolloin myös taajuusmuuttaja pysyy hetken aikaa toimintakykyisenä.

Tavallisesti oheislaitteet tarvitsevat syöttöjännitteeseen tarkasti tavoitearvossaan pysyvän jännitteen, jolloin suoraan verkosta sopivaan jännitetasoon muuntajalla laskettu ja tasasuunnattu jännite ei tarjoa riittävää tarkkuutta. Tasajännitteen tavoitearvossa pysyminen varmistetaan tavallisesti käyttämällä joko lineaariregulaattoria tai takaisinkytkettyä hakkuria. Lineaariregulaattori on tässä tapauksessa yksinkertainen vaihtoehto hakkurille, mutta sitä käyttämällä tehohäviöt kasvavat suureksi.

Koska sekä välipiirin että teholähteen tuottama jännite on tasajännitetä ja taajuusmuuttajalta sekä sen oheislaitteilta edellytetään hyvää hyötysuhdetta, toimii teholähteenä tavallisesti hakkuri, jonka toimintaa tarkastellaan tarkemmin luvussa 2.2. Taajuusmuuttajanratkaisusta riippuen oheislaitteiden teholähteitä saattaa olla vain yksi, jolloin puhallinta ja elektroniikkaa syötetään samalla teholähteellä, mutta usein elektroniikkaa ja puhaltimia syötetään erillisillä teholähteillä. Etenkin suuritehoisten taajuusmuuttajien yhteydessä oheislaitteiden teholähteitä voi olla myös useampi kuin kaksi.

2.2 Hakkuriteholähdetyypit

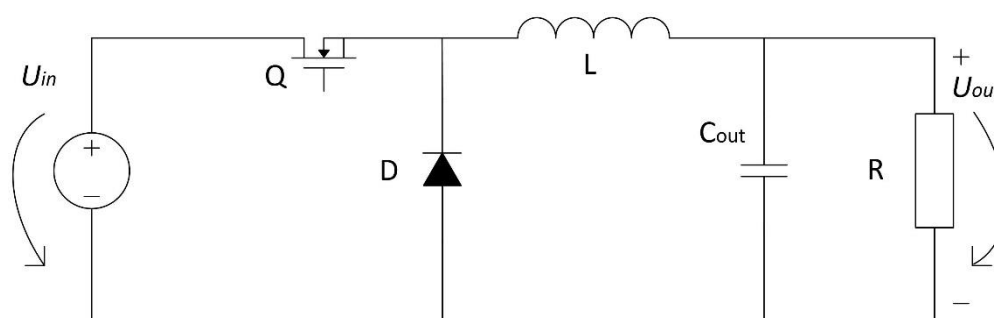
Hakkuri on hyvin yleisesti käytössä oleva teholähdetyyppi. Hakkuri muuntaa sisääntulotasajännitteen hakkurityypistä riippuen joko suurempaan tai pienempää tasajännitteen arvoon. Hakkurin toimintaperiaate perustuu sähkömagneettiseen induktioon sekä virran nopeaan katkomiseen puolijohdekytkimellä eli transistorilla. Toimintaperiaatteensa vuoksi hakkureilla on melko korkea hyötysuhde. Ideaalisen hakkurin hyötysuhde on 100 %, mutta käytännössä hyötysuhde vaihtelee 70–95 % välillä [8]. Tämän vuoksi ne soveltuvat hyvin sovelluksiin, jossa vaaditaan korkean hyötysuhteen omaavia laitteita, kuten esimerkiksi aurinkopaneelien maksimitehopisteen seurantalaitteeksi. Reguloitu ulostulojännite voidaan toteuttaa hakkuriteholähteen sijasta myös lineaariregulaattorilla. Lineaariregulaattori on yksinkertainen vaihtoehto hakkurille, jolla voidaan muuntajan kanssa tuottaa lähes mikä tahansa haluttu ulostulojännite, mutta ilman muuntajaa ulostulojännite ei voi ylittää sisääntulojännitettä.

Lineaariregulaattori aiheuttaa vähäisiä sähkömagneettisia häiriöitä (EMI) tai joissakin tapauksessa ei aiheuta niitä ollenkaan, toisin kuin hakkuriteholähde, joka voi virran nopeasta katkomisesta johtuen aiheuttaa merkittäviä sähkömagneettisia häiriöitä, jolloin häiriötä joudutaan vaimentamaan erilaisilla suotimilla tai suojuksilla. Lineaariregulaattorilla on kuitenkin sen toimintaperiaatteesta johtuen huomattavasti alhaisempi hyötysuhde kuin hakkuriteholähteellä, joten lineaariregulaattoria käytetään hakkurin sijasta usein vain matalan ulostulotehon vaativissa sovelluksissa, jolloin huonosta hyötysuhteesta aiheutuvat häviöt eivät muodostu merkittäväksi. [9]

Hakkurit voidaan luokitella kolmeen pääryhmään: jännitettä laskeva buck-hakkuri (kuva 2.5), jännitettä nostava boost-hakkuri (kuva 2.6) sekä jännitettä joko laskeva tai nostava buck-boost -hakkuri (kuva 2.7). Näistä kolmesta päätopologiasta on kehitetty useita erilaisia hakkuritopologioita, jotka soveltuvat eri tarkoituksiin, mutta ovat perusperiaatteeltaan johonkin näin kolmeen pääryhmään kuuluvan hakkuritopologian mukaisia. Hakkureiden toiminta voidaan jakaa kolmeen eri toimintatilaan kelavirran jatkuvuuden perusteella: jatkuvan johtamisen tila (engl. Continuous Conduction Mode, CCM), kriittisen johtamisen tila (engl. Boundary Conduction Mode, BCM tai Critical Conduction Mode, CRM) ja epäjatkuvan johtamisen tila (engl. Discontinuous Conduction Mode, DCM). [7]

Jatkuvan johtamisen tilassa kuvissa 2.5, 2.6 ja 2.7 esitetyn kelan L virta ei laske kytkentäjakson aikana nolleen eli kelan virta on jatkuvaa. Vastaavasti epäjatkuvan johtamisen tilassa kelan L virta laskee nolaksi jossakin kohdassa kytkentäjaksoa, jolloin kelan virta ei ole jatkuvaa. Jatkuvan ja epäjatkuvan johtamisen tilan välissä sijaitsee kriittisen johtamisen tila, jossa kelan L virta käy nollassa juuri ennen kuin kelan virta alkaa uudelleen kasvaa. [7]

Kuvassa 2.5 on esitetty jännitettä laskeva buck-hakkuri ilman ohjauselektroniikkaa.



Kuva 2.5. Buck-hakkuri.

Kuvassa oleva MOSFET-transistori Q toimii sähköisenä kytkimenä. Kun transistori johtaa, kelan L magneettikenttään varastoituu energiaa ja kuormaa R syötetään jännitelähteen U_{in} tuottamalla jännitteellä, josta vähennetään kelan L yli oleva jännite. Tällöin diodi D on vastasuuntaan biasoitunut, koska katodi on kytketty jännitelähteeseen U_{in} ja diodin anodi on kytketty nollapotentialiin. Kun transistori muutetaan johtamattomaan tilaan, kela vastustaa virranmuutosta muuttamalla kelan yli olevan

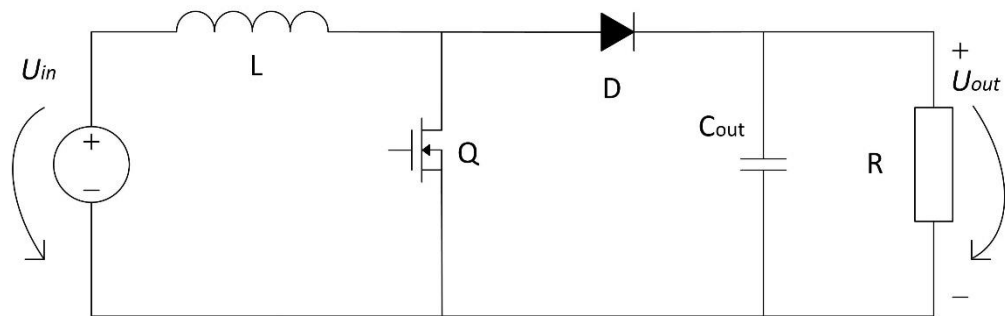
jännitteen napaisuuden vastakkaiseksi ja diodi D tulee myötäsuntaan biasoiduksi. Tällöin kuormaa R syötetään kelan L tuottamalla jännitteellä sekä kondensaattoriin C_{out} varastoituneen energian avulla. Kelan L magneettikenttään varastoituneen energian kelan napoihin tuottama jännite on pienempi kuin jännitelähteen U_{in} tuottama jännite, jolloin ulostulojännitteen U_{out} arvo muodostuu pienemmäksi kuin hakkurin sisääntulojännite U_{in} . Buck-hakkurin tuottama ulostulojännite jatkuvan johtamisen tilassa riippuu sekä sisääntulojännitteestä U_{in} että *pulssisuhteesta* D yhtälön (2.2) mukaisesti.

$$U_{out} = D \cdot U_{in} \quad (2.2)$$

Pulssisuhte D määrittää, kuinka suuren osan kytkentäjaksoista transistori on johtavassa tilassa (engl. on-state). Johtavan tilan kesto aika kytkentäjakson aikana saadaan laskettua yhtälöllä

$$t_{on} = DT_s \quad (2.3)$$

Yhtälössä T_s on kytkentäjakson pituus. Kuvassa 2.6 on esitetty jännitettä nostava boost-hakkuri ilman ohjauselektroniikkaa.



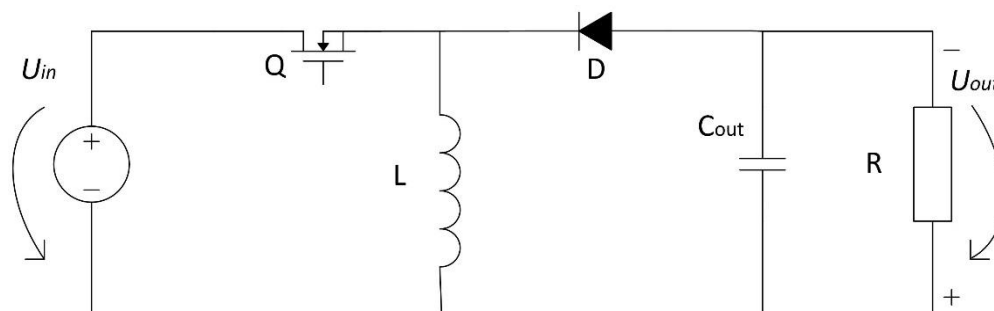
Kuva 2.6. Boost-hakkuri.

Kun transistori Q johtaa, kelan L magneettikenttään varastoituu energiaa ja kuormaa R syötetään kondensaattoriin C_{out} varastoituneen energian avulla. Tällöin diodi D on vastasuuntaan biasoitunut, koska katodi on kytketty kondensaattorin C_{out} positiiviseen potentiaaliin ja diodin anodi on kytketty nollapotentiaaliin, koska transistori johtaa.

Kun transistori muutetaan johtamattomaan tilaan, kela vastustaa virranmuutosta muuttamalla kelan yli olevan jännitteen napaisuuden vastakkaiseksi, jolloin kelan yli oleva jännite ja jännitelähde U_{in} muodostavat sarjaan kytketyn jännitelähteen. Tällöin diodi D tulee myötäbiasoiduksi ja kondensaattori C_{out} latautuu suurempaan jännitteeseen kuin pelkästään jännitelähteen U_{in} tuottama jännite, jolloin myös hakkurin ulostulojännite on suurempi. Boost-hakkurin tuottama ulostulojännite jatkuvan johtamisen tilassa riippuu sekä sisääntulojännitteestä U_{in} että pulssisuhteesta D yhtälön (2.4) mukaisesti.

$$U_{out} = \frac{U_{in}}{1-D} \quad (2.4)$$

Kuvassa 2.7 on esitetty jännitettä laskeva tai nostava buck-boost -hakkuri ilman ohjauselektroniikkaa.



Kuva 2.7. Buck-boost -hakkuri.

Kun transistori Q johtaa, kelan L magneettikenttään varastoituu energiaa ja kuormaa R syötetään kondensaattoriin C_{out} varastoituneen energian avulla. Kun transistori muutetaan johtamattomaan tilaan, kela vastustaa virranmuutosta muuttamalla kelan yli olevan jännitteen napaisuuden vastakkaiseksi, jolloin diodi D tulee myötäsuuntaan biasoiduksi ja kuormaa R syötetään kelan L tuottamalla jännitteellä sekä kondensaattoriin C_{out} varastoituneen energian avulla. Lopputuloksena saadaan sisääntulojännitteeseen nähden käänteisellä polariteetilla oleva ulostulojännite. Buck-boost -hakkuri sisältää siis samankaltaisuuksia sekä edellä esitetyn buck-hakkurin kanssa että boost-hakkurin kanssa. Buck-boost -hakkurin tuottama ulostulojännite jatkuvan johtamisen tilassa riippuu sisääntulojännitteestä U_{in} sekä pulssisuhteesta D yhtälön (2.5) mukaisesti.

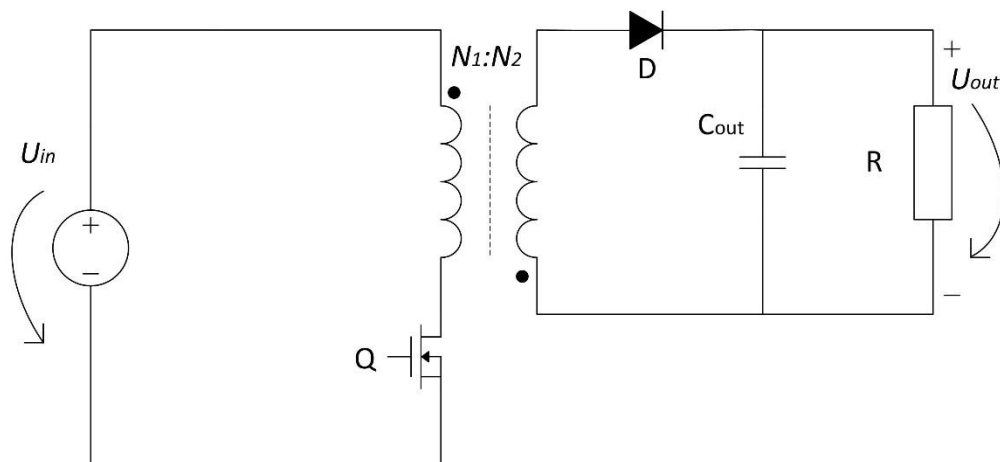
$$U_{out} = \frac{-D \cdot U_{in}}{1-D} \quad (2.5)$$

Yhtälöstä (2.5) nähdään, että jos pulssisuhde D on alle 0,5 ulostulojännitteeksi muodostuu pienempi arvo kuin sisääntulojännite. Jos taas pulssisuhde D on yli 0,5, muodostuu ulostulojännitteeksi suurempi arvo kuin sisääntulojännite. Buck-boost -hakkuri voi siis laskea tai nostaa ulostulojännitettä suhteessa sisääntulojännitteeseen. Luvussa 2.3 käsiteltävä flyback-hakkuri on erääntyypinen buck-boost -hakkuri.

2.3 Flyback-hakkurin toiminta

Flyback-hakkuri on yleisesti käytetty hakkuritopologia, kun ulostulojännitteen tarvitsee olla galvaanisesti erotettu sisääntulojännitelähteestä. Flyback-hakkuri on yksinkertainen ja suhteellisen halpa hakkuritopologia, jolla voidaan helposti tuottaa useita eri jännitetasoja sisääntulojännitteestä. Tämä tekee flyback-hakkurin suosituksi hakkuritopologiaksi matalan, yleensä alle 150 W, ulostulotehon vaativissa sovelluksissa. Flyback-hakkurin hyötysuhde on suhteellisen matala verrattuna muihin hakkuritopologioihin, joten flyback-hakkuri ei yleensä sovellu käytettäväksi korkean

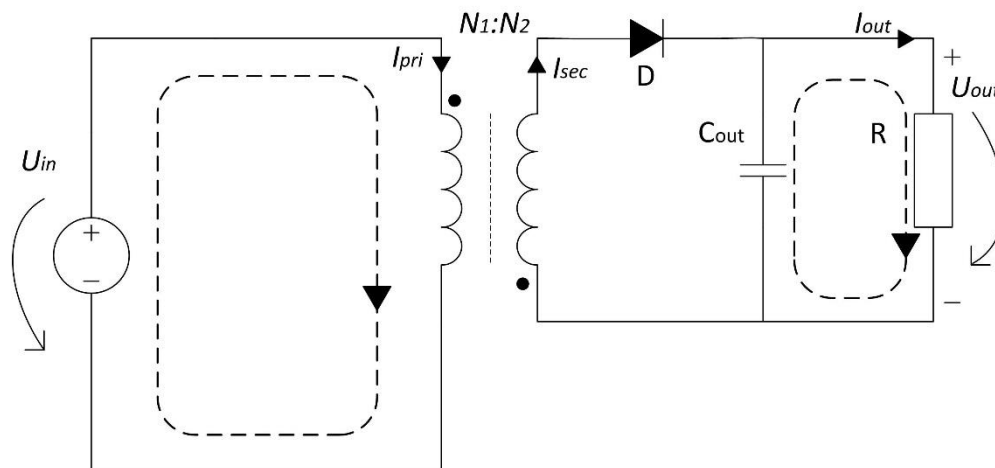
hyötysuhteen tai suuren ulostulotehon vaativissa sovelluksissa. Kuvassa 2.8 on esitetty yhden transistorin vaativa flyback-hakkuri ilman ohjauselektroniikkaa. [10; 11]



Kuva 2.8. Flyback-hakkuri.

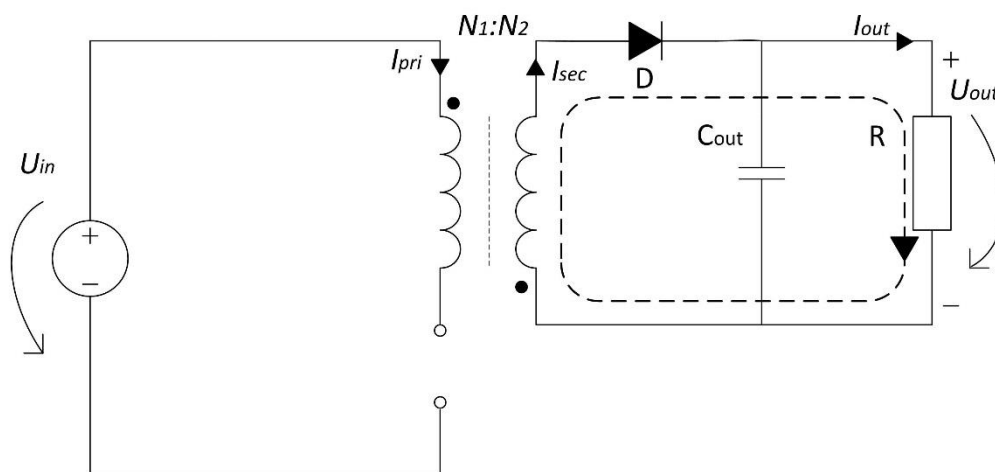
Flyback-hakkurissa voidaan käyttää myös kahta kytkintä, jolloin saavutetaan parempi energiatehokkuus sekä pienempi yhteen kytkimeen kohdistuva jänniterasitus, mutta tällöin hakkuri on hieman monimutkaisempi ja siten kalliimpi. Flyback-hakkurin muuntajan ensiö- ja toisiopuolissa ei kulje virtaa samaan aikaan, joten flyback-hakkurin muuntajan toiminta eroaa tavallisen muuntajan toiminnasta. Flyback-hakkurin muuntajan toiminta muistuttaakin enemmän kuristimen toimintaa energiavarastointikykynsä puolesta. Muuntajan virtojen käyrämuodot on esitetty kuvassa 2.11 ja 2.13.

Kun kuvassa 2.8 esitetty transistori Q ohjataan johtavaan tilaan, hakkurin muuntajan ensiöpuolen virtapiiri sulkeutuu ja ensiöpuolen läpi alkaa kulkea virtaa. Kuvassa 2.8 muuntajan ensiöpuolen käämin pääty, jossa on piste, kytketään suurempaan potentiaaliin. Muuntaja on käämitty siten että toisiopuolen käämin siihen päätyyn, jossa kuvassa 2.8 on piste, muodostuu suurempi potentiaali. Näin ollen toisiopuolelle sijoitettu diodi on vastasuuntaan biasoitunut muuntajan toisiopuoleen kytkeytyvään jännitteeseen nähden, eikä muuntajan toisiopuolella kulje näin ollen virtaa ja kuormaa R syötetään ainoastaan kondensaattoriin C_{out} varastoituneen energian avulla. Kuvassa 2.9 on esitetty flyback-hakkurin virtareitit kytkentäjakson johtavan tilan aikana.



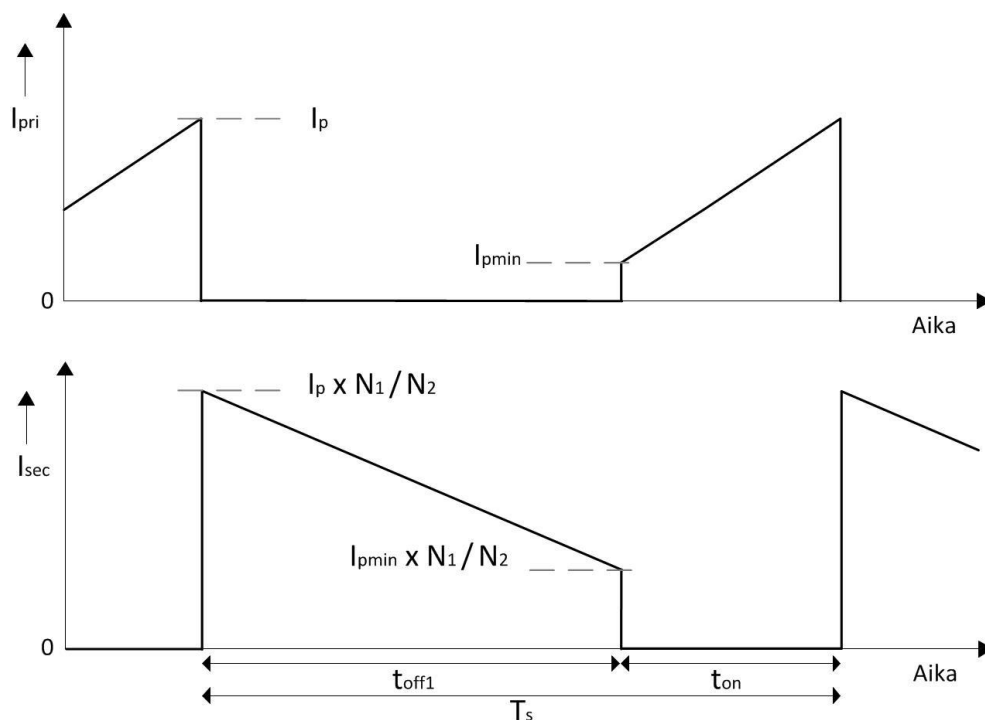
Kuva 2.9. Flyback-hakkurin virtareitit kytkentäjakson johtavan tilan (t_{on}) aikana.

Kun kuvassa 2.8 esitetty transistori Q ohjataan johtamattomaan tilaan, hakkurin muuntajan ensiöpuolen virtapiiri avautuu ja ensiöpuolella ei näin ollen kulje virtaa. Muuntajan käämit pyrkivät vastustamaan virranmuutosta ja näin ollen muuntajan käämeihin muodostuu johtotilan jännitteiden kanssa vastakkaisella polariteetilla olevat jännitteet. Nyt muuntajan toisiopuolen diodi on kytketty myötäsuntaan toisiokäämin jännitteen kanssa ja virta alkaa kulkea toisiokäämin lävitse. Tällöin muuntajan magneettikenttään varastoituneella energialla syötetään hakkurin kuormaa sekä ladataan kondensaattoria C_{out} . Tätä kytkentäjakson osaa kutsutaan ei-johtavaksi tilaksi (engl. off-state). Kuvassa 2.10 on esitetty flyback-hakkurin virtareitit kytkentäjakson ei-johtavan tilan t_{off1} aikana.



Kuva 2.10. Flyback-hakkurin virtareitit kytkentäjakson ei-johtavan tilan (t_{off1}) aikana.

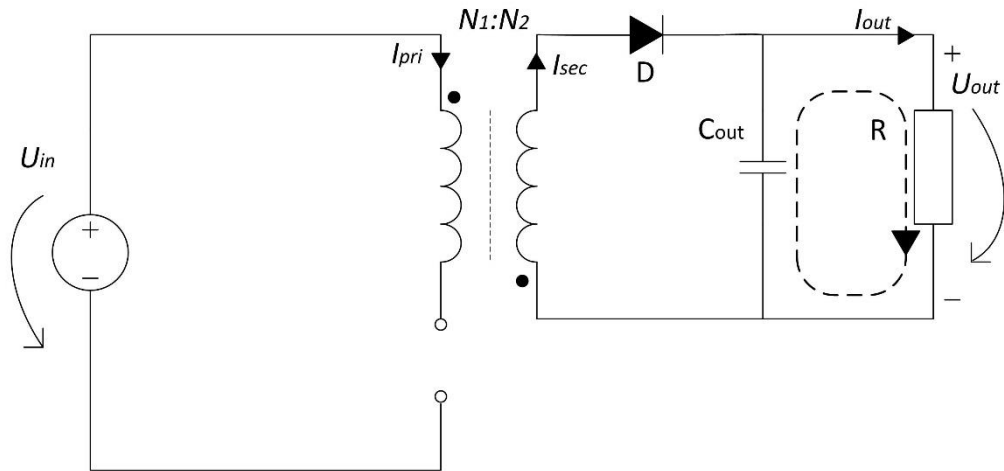
Kuvassa 2.11 on esitetty ideaalisen flyback-hakkurin muuntajan ensiö- ja toisiopuolen virran käyrämuodot jatkuvan johtamisen tilassa, jolloin hakkurin muuntajan ensiö- tai toisiopuolen virta ei laske nolaksi kytkentäjakson aikana.



Kuva 2.11. Ideaalisen flyback-hakkurin muuntajan ensiö- ja toisiopuolen virtojen käyrämuodot jatkuvan johtamisen tilassa.

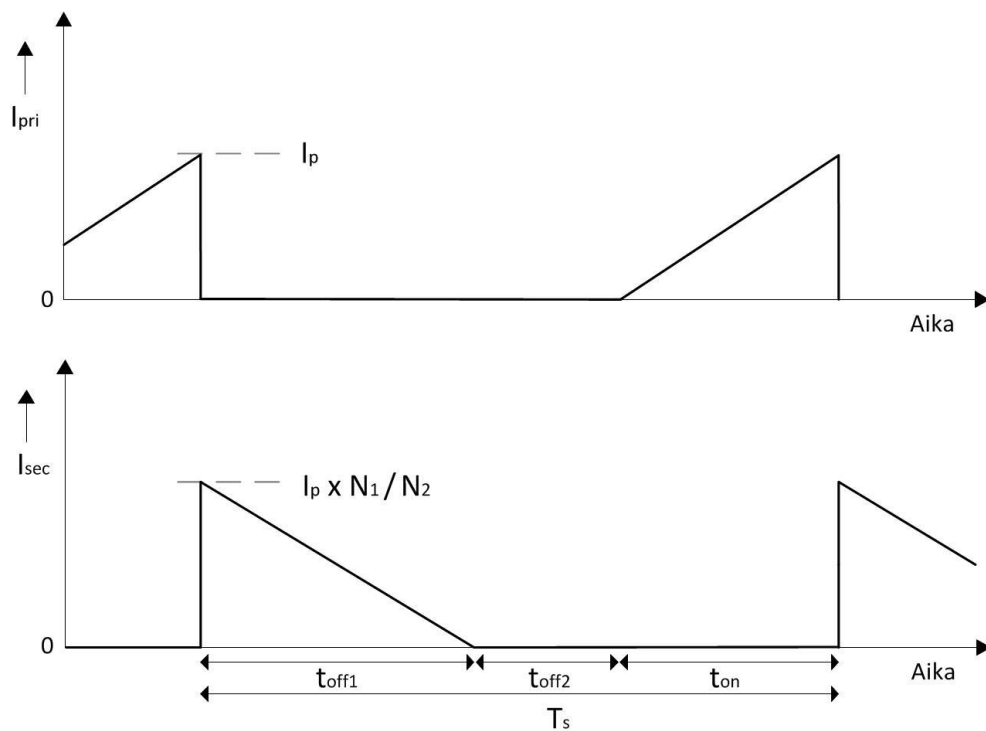
Kuvien 2.9 ja 2.10 lisäksi on mahdollista myös kuvassa 2.12 esitetty kolmas osuus kytkentäjaksossa t_{off2} , jolloin muuntajan magneettikenttään varastoitunut energia syötetään kokonaan kuormalle R sekä kondensaattorille C_{out} . Tällöin muuntajan ensiö- tai toisiopuolella ei kulje ollenkaan virtaa ja kuormaa syötetään ainoastaan kondensaattorilla C_{out} . Tässä tapauksessa muuntajan ensiö- tai toisiopuolella ei kulje jatkuvasti virtaa, ja hakkuria käytetään epäjatkuvan johtamisen tilassa.

Epäjatkuvan johtamisen tilassa muuntajalla ei tarvitse olla niin suurta induktanssia kuin jatkuvan johtamisen tilassa, jolloin muuntaja voi olla fyysisesti pienempi kuin jatkuvan johtamisen tilassa. Toisaalta epäjatkuvan johtamisen tilassa muuntajan ensiö- ja toisiovirran huippuarvo on suurempi kuin jatkuvan johtamisen tilassa pienestä induktanssista johtuen. Tavallisesti hakkuriteholähde suunnitellaan toimimaan joko jatkuvan tai epäjatkuvan johtamisen tilassa. Kriittisen johtamisen tilaa ei tavallisesti käytetä flyback-hakkurin tapauksessa, koska toleransseista riippuen toiminta voisi vaihdella jatkuvan ja epäjatkuvan johtamisen tilan välillä. Tämä ei ole suotavaa siksi, että hakkuriteholähteen käyttäytyminen on erilainen eri toimintatiloilla.



Kuva 2.12. Flyback-hakkurin virtareitit epäjatkuvan johtamisen tilassa ei-johtavan-tilan aikana (t_{off2}), kun muuntajan magneettikenttään varastoitunut energia on syötetty kokonaan kuormalle R sekä kondensaattorille C_{out} .

Kuvassa 2.13 on esitetty ideaalisen flyback-hakkurin muuntajan ensiö- ja toisiopuolen virran käyrämuodot epäjatkuvan johtamisen tilassa.



Kuva 2.13. Ideaalisen flyback-hakkurin muuntajan ensiö- ja toisiopuolen virtojen käyrämuodot epäjatkuvan johtamisen tilassa.

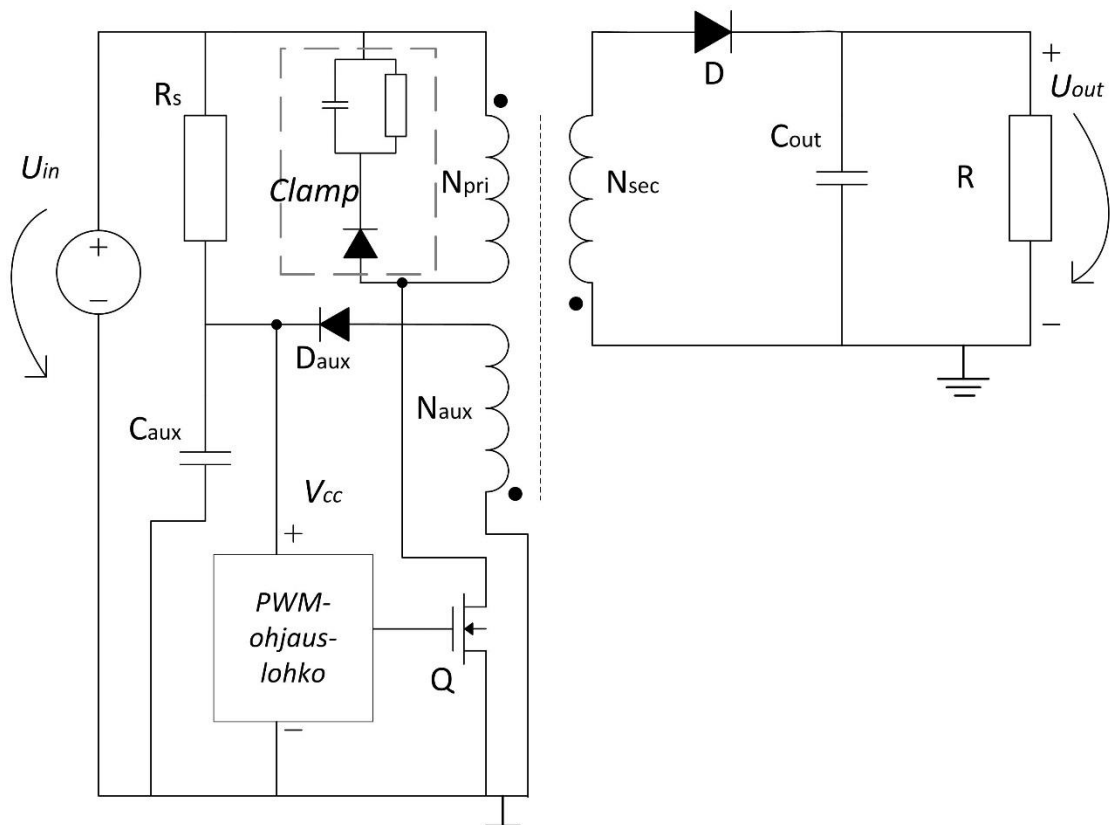
Kuvissa 2.11 ja 2.13 I_{pri} on muuntajan ensiöpuolen virta ja I_{sec} on toisiopuolen virta. Kuten kuvasta 2.11 nähdään, ensiöpuolenvirta nousee arvosta I_{pmin} arvoon I_p kytkentäjaksen johtavan tilan t_{on} aikana. Muuntajan toisiopuolenvirta vastaavasti laskee arvosta $I_p \times N_1/N_2$ arvoon $I_{pmin} \times N_1/N_2$ kytkentäjaksen ei-johtavan tilan aikana. Ideaalisen muuntajan ensiö-

ja toisiokäämien virtojen huippuarvot ovat siis verrannollisia toisiinsa muuntajan ensiö- ja toisiokierroslukumäärien N_1 ja N_2 suhteen. Ideaalisen flyback-hakkurin tuottama ulostulojännite voidaan laskea yhtälön (2.6) mukaisesti jatkuvan johtamisen tilassa.

$$U_{out} = \frac{U_{in} \cdot D}{\frac{N_1}{N_2} \cdot (1-D)} \quad (2.6)$$

Yhtälöstä nähdään, että ulostulojännite U_{out} riippuu flyback-hakkurissa pulssisuhteen ja sisääntulojännitteen U_{in} lisäksi myös ensiö- ja toisiokäämien kierroslukujen suhteesta N_1/N_2 . Riippuen pulssisuhteen ja ensiö- ja toisiokäämien kierroslukujen suhteesta flyback-hakkuri voi toimia joko jännitettä nostavana tai laskevana hakkurina.

Kuvassa 2.14 on esitetty flyback-hakkuri PWM-ohjauslohkon ja clamp-piirin kanssa. PWM-ohjauslohko on pulssinleveysmodulaatioon (engl. PWM, Pulse-Width Modulation) perustuva ohjauslohko, joka ohjaa transistoria johtavaan ja johtamattomaan tilaan niin, että haluttu ulostulojännite saavutetaan. Pulssinleveysmodulointia käytetään yleisesti myös taajuusmuuttajan vaihtosuuntaajan modulointitapana. Hakkurin yhteydessä pulssinleveysmoduloinnissa säädetään pulssisuhdetta D . Clamp-piiriä on käsitelty jäljempänä tässä luvussa.



Kuva 2.14. Flyback-hakkuri PWM-ohjauslohkon ja clamp-piirin kanssa.

Kun flyback-hakkurin sisääntuloon kytketään jännite U_{in} , PWM-ohjauslohkolle käyttöjännitteen V_{cc} tarjoava kondensaattori C_{aux} latautuu vastuksen R_s kautta. Vastuksen

R_s arvo on melko suuri, tyypillisesti useita kilo ohmeja, koska sitä käytetään vain kondensaattorin C_{aux} lataamiseen ja samalla PWM-ohjaimen käynnistämiseen. Kondensaattorin C_{aux} lataaminen voidaan suorittaa myös muillakin tavoilla. Kun kondensaattorin C_{aux} jännite on noussut riittävän suureksi, PWM-ohjain käynnistyy ja ohjaa transistorin ensimmäistä kertaa johtavaan tilaan, minkä seurauksena muuntajan ensiökäämissä kulkee virtaa ensimmäistä kertaa. Kun PWM-ohjain ohjaa transistorin johtamattomaan tilaan, virta ensiökäämissä katkeaa ja toisiokäämissä alkaa kulkea virtaa, kuten edellä on esitetty.

Todellisen flyback-hakkurin muuntajassa on mukana myös käämitys N_{aux} kuvan 2.14 mukaisesti. Tätä käämiä kutsutaan apukäämiksi ja sen avulla ladataan kondensaattoria C_{aux} , kun PWM-ohjain on käynnistynyt. Apukäämissä kulkee virta kytkentäjakson aikana samaan aikaan kuin muuntajan toisiokäämissä. Apukäämi katsotaan kuitenkin kuuluvan muuntajan ensiöpuoleen, koska sen nollapiste sijaitsee samassa potentiaalissa kuin ensiökäämillä. Toisiokäämillä nollapiste voi olla eri kuin ensiö- ja apukäämillä galvaanisen erotuksen takia. Tässä työssä muuntajan ensiöpuolen nollapiste on taajuusmuuttajan välipiirin miinuskisko ja toisiopuolen nollapiste on maan välillä voi esiintyä potentiaalieroja. Taajuusmuuttajaa syöttävän sähköverkon jännitteestä ja maadoitustyyppistä riippuen miinuskiskon ja maan välillä voi olla useiden satojen volttien potentiaaliero. Tällaisessa tilanteessa muuntajan täytyy toteuttaa turvaerotusvälin vaatimukset, mikäli hakkurin ulostulon pitää tarjota käyttäjälle suojaa sähköiskulta [1].

Kuvasta 2.13 poiketen PWM-ohjauslohkolle tuodaan tavallisesti vielä takaisinkytkentä ulostulojännitteestä U_{out} , jolloin muodostuu suljettu säätösilmukka ja ulostulojännite pysyy halutunlaisena hakkurin kuormituksesta sekä sisääntulojännitteestä riippumatta. Myös takaisinkytkennän täytyy jossakin kohdassa sisältää galvaaninen erotus, koska signaali kulkee muuntajan toisiopuolelta ensiöpuolelle, joiden välillä on galvaaninen erotus. Takaisinkytkennän erotus toteutetaan tavallisesti optoerottimella.

Hajasuureilla tarkoitetaan ei-toivottuja kapasitansseja tai induktansseja järjestelmän eri osien välillä. Tämän vuoksi ensiökäämin rinnalle kytketään myös kuvassa 2.14 katkoviivalla merkitty *clamp-piiri*. Clamp-piirin tarkoitus on rajoittaa muuntajan ensiöpuolella esiintyviä jännitepiikkejä, jotka lyhentävät komponenttien elinikää [12, s. 1]. Jännitepiikkejä aiheutuu kytkimelle (transistori) hajainduktanssista kommutoinnin aikana. Tässä tapauksessa kommutoinnilla tarkoitetaan lyhyttä hetkeä, jolloin virta kulkee muuntajan ensiö- ja toisiopuolella samanaikaisesti heti sen jälkeen, kun kytkin on ohjattu johtamattomaan tilaan. Hajainduktanssilla kuvataan energiamäärää, joka varastoituu kahden käämin välillä olevaan hajavuohon. Hajavuolla tarkoitetaan magneettivuon osaa, joka ei kytkeydy suunnitellusti kahden käämin välille, vaan kulkee muuntajasydämen ikkunan kautta käämitysten välissä [13, s. 5]. Hajavuohon varastoitunutta energiaa ei heti voida syöttää toisiokäämiin, kun kytkin suljetaan, vaan hajavuo pyrkii vastustamaan ensiökäämin virran muutosta aiheuttaen näin jännitepiikin kytkimelle. Hajainduktanssi laskee myös hyötysuhdetta, mikäli hajavuohon

varastoitunutta energiaa ei voida kierrättää [14, s. 6]. Tyypillisesti hajainduktanssi on 1–8 % ensiökäämininduktanssista [15, s. 144]. Mikäli hakkurilla on useita ulostuloja ja siten useita toisiokäämejä, hajainduktanssi aiheuttaa ristiinregulointia niiden välillä (engl. cross-regulation). Ristiinreguloinnilla tarkoitetaan tilannetta, jossa yhden ulostulon kuormituksen muuttuminen vaikuttaa muiden ulostulojen jännitetasoihin [14, s. 6]. Hajainduktanssi ensiö- ja toisiokäämin välillä voidaan minimoida muodostamalla parempi magneettivuon kytkeytyminen käämien välillä. Magneettivuon kytkeytymistä voidaan parantaa muun muassa pienentämällä ensiö- ja toisiokäämin etäisyyttä sekä lomittamalla ensiö- ja toisiokäämitys [14].

Clamp-piirien yleinen toimintaperiaate on rajoittaa piikkijännitettä käyttämällä kondensaattoria pienen impedanssin jännitelähteenä, joka kytketään nopean diodin avulla sisääntulojännitteen positiiviseen kiskoon [11, s. 591]. Clamp-piiri muodostaa siis virtareitin hajainduktanssista aiheutuvalle virralle. Kuvassa 2.14 clamp-piiri koostuu rinnakkain kytketystä vastuksesta ja kondensaattorista sekä niiden kanssa sarjaan kytketystä diodista. Tällaista kytkentää kutsutaan RCD clamp-piiriksi. Kun transistori kytketään johtamattomaan tilaan, clamp-piirin diodi tulee myötäsuuntaan biasoiduksi ja hajainduktanssista aiheutuva virta syötetään piirin kondensaattorille. Tämän jälkeen kondensaattorin rinnalla oleva vastus muuttaa kondensaattoriin varastoituneen hajainduktanssista aiheutuneen energian lämmöksi. RCD clamp-piirin avulla hajavuohon varastoitunutta energiaa ei voida siis kierrättää, koska hajavuohon varastoitunut energia muutetaan lämmöksi. Jos vastuksen arvo on pieni, piiri vaimentaa hyvin hajainduktanssista aiheutuvan piikkijännitteen, mutta tällöin häviöt ovat suuret ja hakkurin hyötysuhde laskee. Suurella vastuksen arvolla vastaavasti hyötysuhde on parempi, mutta jännitepiikin vaimennus on huonompi. Clamp-piiri voidaan toteuttaa myös muunlaisilla kytkennöillä, mutta esimerkkinä käytetty RCD clamp-piiri on hyvin yleisesti käytetty. [12]

Hajasuureita ei voida koskaan eliminoida kokonaan, koska virtasimukassa esiintyy aina induktanssia ja toisistaan eristettyjen kohteiden välillä esiintyy aina kapasitanssia [13, s. 5]. Hajasuureiden suuruuteen voidaan kuitenkin vaikuttaa järjestelmän suunnittelun avulla [13, s. 5]. Flyback-hakkurissa hajakapasitanssia esiintyy lähinnä muuntajan käämityksissä sekä diodeissa. Hajakapasitanssit ovat hakkurille haitallisia lähinnä siten, että ne voivat yhdessä hajainduktanssin kanssa aiheuttaa erilaisia värähtelyjä ja resonansseja hakkuriin, joita kutsutaan usein soimiseksi (engl. ringing). Esimerkiksi toisiojännitteellä on taipumusta oskilloida johtuen muuntajan hajainduktanssista sekä muuntajan ja toisiopuolen diodin hajakapasitanssista [14, s. 9]. Flyback-hakkurin muuntajan rakennetta ja materiaaleja on käsitelty tarkemmin luvussa 5.

2.4 Suojaerotusväleille standardeissa määritellyt vaatimukset

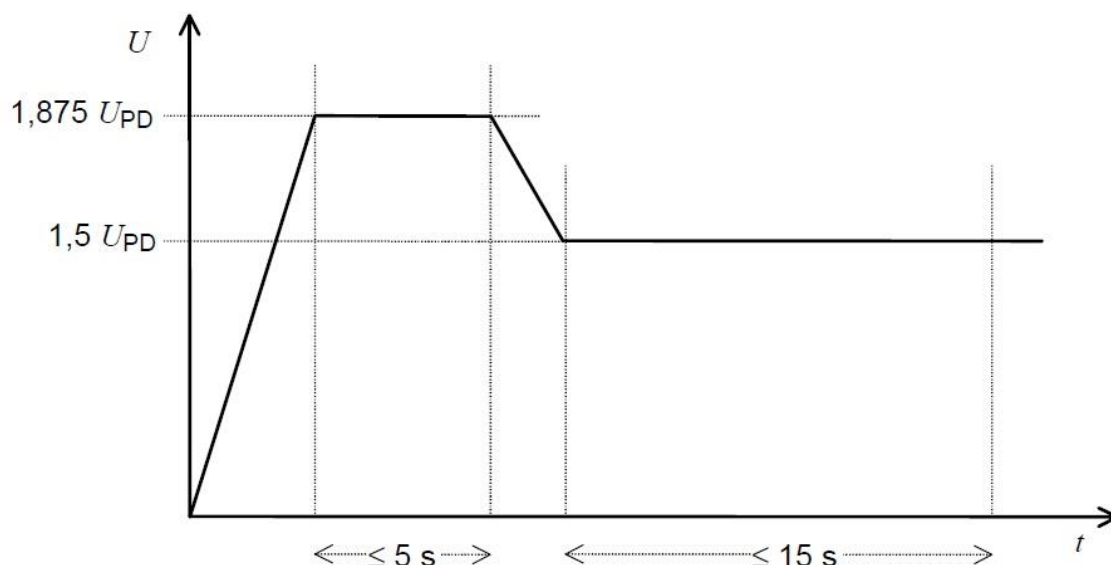
Tässä luvussa käsitellään taajuusmuuttajissa oleville sekä muuntajalla toteutetuille suojaerotusväleille ja niiden testaamiselle standardeissa asetettuja vaatimuksia. Standardi IEC 61800-5-1:2007 määrittelee taajuusmuuttajajärjestelmille tai niiden osille sähkö-, lämpö- ja energiaturvallisuusvaatimukset [1]. Standardissa taajuusmuuttajajärjestelmään katsotaan kuuluvan tehonmuunto, järjestelmän ohjaus ja moottori tai moottorit. Standardia sovelletaan AC-käyttöjärjestelmiin, joiden sisääntulovaihtojännite on enintään 35 kV, jonka taajuus on 50 Hz tai 60 Hz, ja ulostulojännite enintään 35 kV.

Standardi määrittelee, että suojaerotusvälilliselle laitteen suojaerotusvälille ja sen komponenteille pitää suorittaa syöksyjännitetesti sekä *tyyppitestinä* (type test) että *näytetestinä* (sample test). Tyyppitestissä testataan yksi tai useampi laite, jotka on tehty tietyllä suunnitteluratkaisulla, että ne täyttävät niille asetetut vaatimukset. Näytetesti tehdään sattumanvaraisesti valmistuserästä poimitulle laitteelle. Tämän työn yhteydessä suojaerotusvälinä toimii flyback-hakkurin muuntaja. Tässä työssä käsiteltävien muuntajien syöksyjännitetestin syöksyjännitteen huippuarvoksi muodostuu 8 kV, koska järjestelmän jännite on enintään 1 kV ja muuntaja ei ole kytketty suoraan sähköverkon vaihejännitteisiin. Standardin mukaan syöksyjännitetesti tehdään 3 syöksyjännitepulssilla molemmilla jännitteen polariteeteilla eli yhteensä 6 pulssia. Pulssien välillä pitää olla vähintään 1 sekunti. [1]

Standardin mukaan erotusvälille eli tässä tapauksessa flyback-hakkurin muuntajalle pitää suorittaa tyyppitestinä sekä *rutiinitestinä* (routine test) vaihtojännitetesti, esimerkiksi 1 kV käyttöjännitteellä muuntajan testijännitteeksi muodostuu 2,2 kV. Rutiinitesti suoritetaan jokaiselle laitteelle valmistuksen jälkeen, jotta voidaan varmistua siitä, että laite täyttää tietyt sille asetetut kriteerit.

Standardin mukaan erotusvälille, mikäli se toimii suojaerotusvälinä, on tehtävä osittaispurkaustesti, jos toistuva huippujännite eristysrakenteen yli on suurempi kuin 750 V ja jänniterasitus on yli 1 kV/mm[1, s. 41]. Osittaispurkaustesti tulee suorittaa sekä tyyppitestinä että näytetestinä. Osittaispurkaustesti voidaan jättää suorittamatta, mikäli eristysrakenne on tehty sellaisista materiaaleista, jotka eivät vaurioidu osittaispurkauksen vaikutuksesta, kuten esimerkiksi keraameista. Osittaispurkaustestin tarkoituksena on varmistaa, että suojaerotusvälin eristysrakenne säilyy osittaispurkauksista vapaana tietyllä jännitealueella, eivätkä osittaispurkaukset näin ollen pääse vaurioittamaan eristysrakennetta.

Standardin määrittelemä osittaispurkaustestin koejännite on esitetty kuvassa 2.15.



Kuva 2.15. Standardissa määritelty koejännite [1, s. 70].

Kuvassa 2.15 U_{PD} on sovelluskohtainen toistuva huippujännite erotusvälin ylitse. Testissä jännite nostetaan lineaarisesti jännitteen U_{PD} alapuolelta arvoon $1,875 U_{PD}$, jossa sitä pidetään enintään 5 sekunnin ajan, minkä jälkeen jännite lasketaan lineaarisesti jännitteen arvoon $1,5 U_{PD}$. Jännite pidetään tässä arvossa enintään 15 sekunnin ajan, jolloin osittaispurkaukset mitataan. Testi todetaan läpäistyksi, jos osittaispurkauksien suuruus mittauksen aikana on alle 10 pC. Standardin mukaan testissä olevan suojaerotusvälin eri puolille kuuluvat osat kytketään yhteen eli esimerkiksi kuvan 2.14 flyback-hakkurin muuntajassa ensiö- ja apukäämi oikosuljetaan ja kytketään yhteen sekä toisiokäämi oikosuljetaan. Koejännite kytketään ensiöpuolen käämien ja toisiokäämin välille. Vaikka apukäämi toimii muuntajan toisiokäämin tavoin ja siinä kulkee virta samaan aikaan kuin toisiokäämissä, se katsotaan testissä kuuluvan muuntajan ensiöpuoleen, koska apukäämin nollapisteenä toimii sama piste kuin ensiökäämillä eli tässä työssä taajuusmuuttajan välipiirin miinuskisko. Toisiokäämille nollapisteenä toimii sen sijaan maa. Välipiirin miinuskisko ei ole maadoitettu, joten miinuskiskon ja maan välillä voi olla tapauksesta riippuen huomattava potentiaaliero.

3 SÄHKÖKENTÄN VAIKUTUS ERISTEESEEN

Tässä luvussa käydään läpi sähkökentän vaikutuksia eristeeseen sekä eri läpilyöntimekanismeja, jotka ovat hyödyllisiä osittaispurkauksen luonteen ymmärtämiseksi. Eristysrakenteen ensisijainen tehtävä on erottaa eri potentiaalissa olevat laitteen osat toisistaan. Todellisuudessa eristysrakenteet eivät ole ideaalisia johtamattomia rakenteita, vaan eristysrakenteessa kulkee aina jonkin verran vuotovirtaa, kun sen yli on potentiaaliero. Laskettaessa eristysrakenteessa olevia sähkökentän jakaumia voidaan johtavuuden vaikutus olettaa niin pieneksi, että sitä ei tarvitse huomioida. Tämä oletus voidaan tehdä tarkasteltaessa jännitelujuutta vaihtojännitteellä tai muilla nopeasti vaihtelevilla jännitemuodoilla. Tasajännitteellä tai muilla hitaasti vaihtelevilla jännitteillä johtavuus tulee huomioida. Johtavuuden huomiotta jättäminen mahdollistaa staattiselle sähkökentälle pätevien yhtälöiden käyttämisen laskennassa. Tämän lisäksi tutkittavan eristysrakenteen tai sen osan on oltava homogeeninen eli eristeen ominaisuuksien tulee pysyä samana tarkasteltavassa tilavuudessa, isotrooppinen eli sähkövuon ja sähkökentän on oltava samansuuntaiset ja eristeen susceptibiliteetti eli polaroituvuus sähkökentässä ei saa riippua sähkökentän voimakkuudesta. [16]

Staattisen sähkökentän lähteenä on aina sähkövarauksia. Sähkövarausten synnyttämää sähkökenttää voidaan tarkastella sähkövuon avulla. Homogeenisessa ja isotrooppisessa aineessa sähkövuon tiheys \bar{D} on verrannollinen sähkökentän voimakkuuteen \bar{E} yhtälön (3.1) mukaisesti.

$$\bar{D} = \epsilon \bar{E} \quad (3.1)$$

Yhtälössä ϵ on permittiviteetti. Permittiviteetti määrää kussakin väliaineessa tietyn sähkökentän aiheuttaman sähkövuon tiheyden. Permittiviteetti kuvaa myös aineen polaroitumiskykyä eli sitä kuinka paljon energiaa aine voi varastoida itseensä. Polarisaatio tapahtuu, kun sähkökenttä aiheuttaa eristeen atomien ja molekyylien positiivisiin ja negatiivisiin osiin eri suuntiin kohdistuvan voiman, jolloin eristeen atomien ja molekyylien osaset siirtyvät hieman normaalitilan asemastaan. Polarisaatio on vaihtojännitteillä merkittävin tehohäviöitä aiheuttava mekanismi eristeissä, koska molekyylien kääntyileminen vaihtuvan sähkökentän suunnan takia lämmittää eristettä kitkan vaikutuksesta. Myöskään eristeen varautuminen ei ole ideaalinen tapahtuma eli eristeen varautuminen seuraa eristeen yli olevaa jännitettä viiveellä. Yleensä eristeen permittiviteetti lausutaan suhteellisenä permittiviteettinä ϵ_r yhtälön (3.2) mukaisesti. [17]

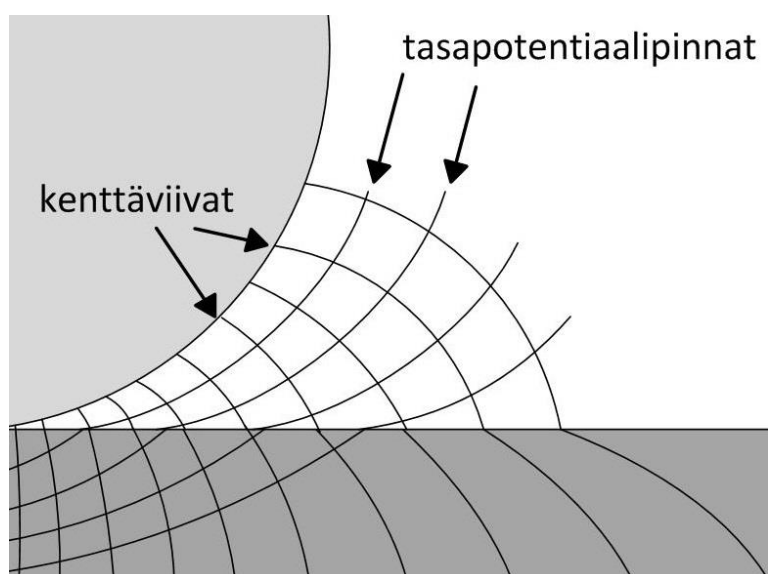
$$\epsilon_r = \frac{\epsilon}{\epsilon_0} \quad (3.2)$$

Yhtälössä ε_0 on tyhjän permittiviteetti, jonka arvo on $8,85 \cdot 10^{-12}$ As/Vm. Tavallisesti sähkövuon tiheys pysyy eristysrakenteen tarkasteltavalla alueella vakiona, eli eristysrakenteen sisällä ei ole varauksia. Tällöin eristysrakenteen eri eristekerroksissa sähkökentän voimakkuus riippuu permittiviteetistä yhtälön (3.1) mukaisesti ja eriste, jolla on pienin permittiviteetti, joutuu alttiiksi suurimmalle rasitukselle. Useamman eristekerroksen eristysrakenteessa sähkökentän voimakkuutta voidaan siis säätää eristeiden permittiviteettien valinnalla. [16]

Kahden eristeen, joiden permittiviteetit ovat erisuuret, rajapinnalla sähkövuovektorin suunta muuttuu sen siirtyessä eristeestä toiseen, jos sähkövuo kohtaa eristeiden rajapinnan muussa kuin 90° kulmassa. Isotrooppisessa aineessa sähkökentän suunta on sama kuin sähkövuon suunta, jolloin myös sähkökentän suunta muuttuu. Jos oletetaan, että eristeissä ei ole johtavuutta eli varauksia ei kerry eristeiden rajapinnoille, sähkökentän taipumisen määrää eristeiden permittiviteettien suhde yhtälön (3.3) mukaisesti.

$$\frac{\tan \alpha_1}{\tan \alpha_2} = \frac{\varepsilon_1}{\varepsilon_2} \quad (3.3)$$

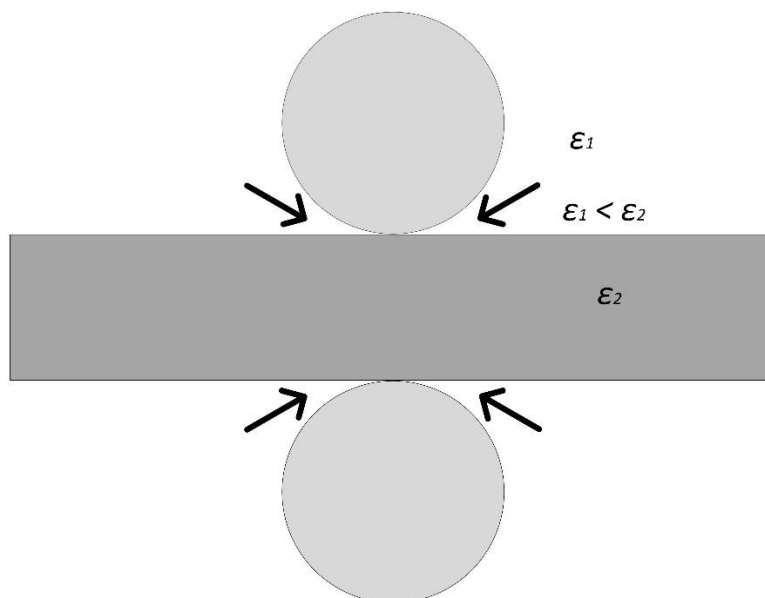
Yhtälössä kulma α_1 on sähkövuon tulokulma kohtisuoraan eristeiden rajapintaan nähden. Sähkökentän taipuminen voi aiheuttaa suuria sähkökentän tihentymiä silloin, kun kahden eristeen, joilla on eri permittiviteetit, rajapinta kulkee vinosti elektrodipintojen välissä kuvan 3.1 mukaisesti [16].



Kuva 3.1. Sähkökentän tihentyminen ilmassa eristeiden rajapinnalla.

Yhtälön (3.3) mukaisesti myös vuoviivojen suunta muuttuu eristeiden rajapinnassa, jos eristeiden permittiviteetit ovat erisuuret. Kuvassa 3.1 olevat tasapotentialiaalipinnat tarkoittavat pintaa, jonka potentiaali on vakio kaikissa pinnan kohdissa eli kuvan 3.1 tapauksessa kaikissa kyseisen tasapotentialiaalipinnan viivan kohdissa.

Tasapotentialipinnat ovat aina kohtisuorassa vuoviivoja vastaan, eivätkä tasapotentialipinnat koskaan leikkaa toisiaan. Kenttäviivojen taipuminen pakottaa tasapotentialipinnat lähemmäksi toisiaan lähestyttäessä kuvassa 3.2 nuolien osoittamia pisteitä. Tämä aiheuttaa jänniterasituksen kasvamista nuolien osoittamissa paikoissa. [16]



Kuva 3.2. Kiinteä eristepala vaaleanharmaalla piirrettyjen elektrodien välissä. Suuri jänniterasitus nuolien osoittamissa paikoissa.

Jos sähkökenttä tihtyy jossakin eristysrakenteen pisteessä, aiheutuu kyseissä kohdassa helpommin eristeen läpilyönti. Esimerkiksi, jos kuvan 3.2 eriste ϵ_1 on ilmaa, jonka permittiviteetti on pieni ja läpilyöntilujuus on alhainen, tapahtuu eristysrakenteessa ilmapälin läpilyönti nuolen osoittamassa kohdassa pienemmällä jännitteellä kuin läpilyönti kiinteän eristeen ylitse. Sähkökenttää, jonka suuruus ei ole jokaisessa eristysrakenteen kohdassa yhtä suuri, kutsutaan epähomogeeniseksi sähkökentäksi. Sähkökentän tihtymisiä esiintyy myös kuvan 3.2 mukaisen tilanteen lisäksi etenkin terävien nurkkien ja reunojen läheisyydessä. Yleisesti sähkökentän tihtymisiä voidaan välttää käyttämällä eristysrakenteessa mahdollisimman pyöreitä muotoja. [16]

Sähkökentän taipumista eristeiden rajapinnoissa voidaan käyttää myös hyväksi jänniterasitusten pienentämiseksi. Sähkökentän muotoon eristysrakenteessa voidaan vaikuttaa esimerkiksi eristysrakenteen geometrialla ja ohjauselektrodeilla (johtavia tai puolijohtavia pintoja). Elektrodin metallipinta on aina tasapotentialipinta ja pinnan läheisyydessä tasapotentialipintojen on pakko kulkea lähes pinnan suuntaisesti. Tämän vuoksi sähkökentän kenttäviivojen on kuljettava metallipinnasta kohtisuoraan eristeeseen, kuten yhtälöstä (3.3) on nähtävissä. Kun sähkökenttä kulkee hyvin suuren permittiviteetin omaavasta aineesta paljon pienemmän permittiviteetin omaavaan aineeseen, sähkökenttä lähtee rajapinnasta jälkimmäiseen aineeseen lähes kohtisuorassa rajapintaa vastaan. Luvussa 3.1 on käsitelty sähköpurkauksia ja niiden syntymismekanismeja, kun eristeen läpilyöntilujuus ylittyy. [16]

3.1 Kaasujen läpilyönti

Kuten edellä on todettu, eristeen läpi kulkee aina vuotovirtaa, kun sen yli vaikuttaa jännite. Mikäli vuotovirta kasvaa merkittävästi eristeen läpi, tällöin eristeessä tapahtuu sähköpurkauksia tai eriste on vaurioitumassa. Täydellisellä sähköpurkauksella tarkoitetaan tilannetta, jolloin sähköpurkaus yhdistää elektrodit toisiinsa ja koko eristysrakenne menettää eristysominaisuutensa. Tällöin eristysrakenteen läpi kulkee suuri virta ja jännite eristeen yli on hyvin pieni. Purkaushetkellä eristeen läpi syntyy voimakkaasti ionisoitunut ja hyvin kuuma kanava, jota kutsutaan valokaareksi. [16]

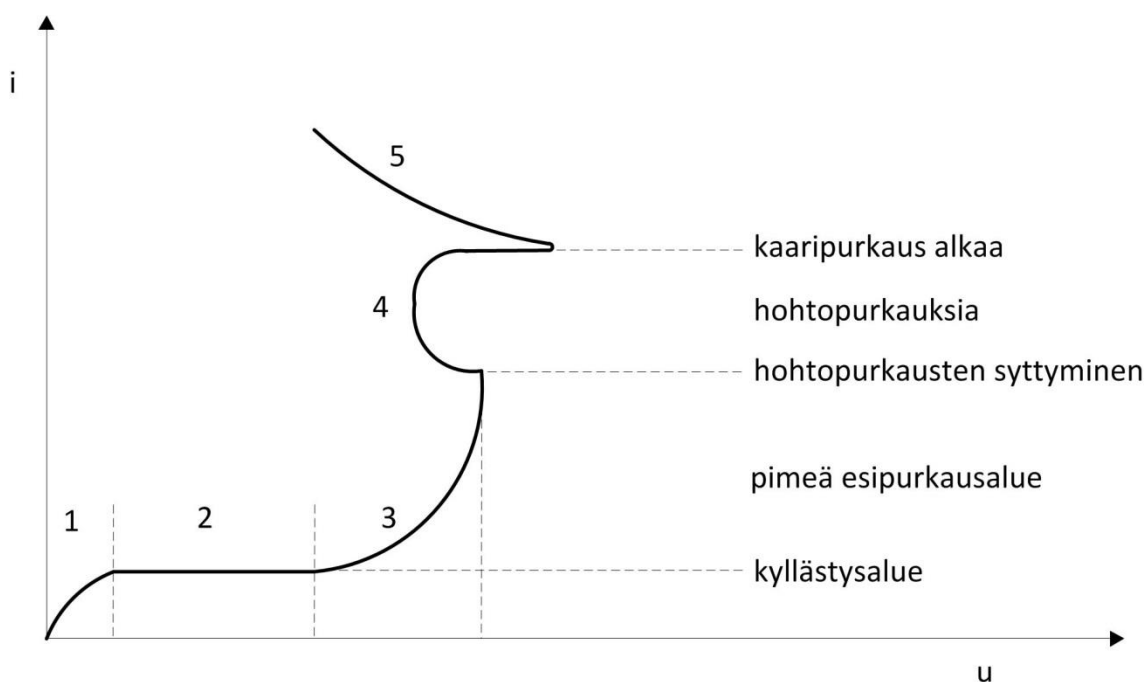
Täydellistä purkausta kutsutaan läpilyönniksi silloin, kun purkauskanava kulkee eristeen läpi. Purkauksen tapahtuessa kahden eristeen rajapintaa pitkin, joista toinen on kaasu, kutsutaan purkausta ylilyönniksi. Sähköpurkaus voi olla myös epätäydellinen, jolloin purkaus ei yhdistä elektrodeja toisiinsa. Luvussa 4 käsiteltävät osittaispurkaukset ovat yksi epätäydellisen purkauksen muoto. [16]

Kaasut ovat palautuvia eristeitä. Tämä tarkoittaa, että ne toimivat vielä läpilyönnin jälkeenkin yleensä hyvänä eristeenä. Kiinteän eristysrakenteen läpilyönti puolestaan jättää eristykseen pysyvän kanavan, joka alentaa huomattavasti eristysrakenteen jännitelujuutta sen alkuperäisestä tasosta. [16]

Eristeissä esiintyvä vuotovirta aiheutuu varauksenkuljettajien eli elektronien sekä positiivisten ja negatiivisten ionien liikkumisesta sähkökentässä. Tärkeimmät varauksenkuljettajat ovat *vapaat elektronit*, joilla on merkittävä osa sähköpurkauksen synnyssä. Vapaalla elektronilla tarkoitetaan elektronia, joka pääsee liikkumaan atomista toiseen ja voi näin ollen toimia varauksenkuljettajana. Vapaita elektroneja eristeeseen voi syntyä säteilyn (avaruussäteily, radioaktiivinen säteily, röntgensäteily, ultraviolettisäteily ja valo) tai ionisaation (sysäysionisaatio ja terminen ionisaatio) vaikutuksesta. Uuden vapaan elektronin seurauksena eristeeseen syntyy aina myös positiivinen ioni. Vapaita elektroneja ja ioneja poistuu jatkuvasti eristeestä erilaisten mekanismien kautta. Vapaa elektroni voi esimerkiksi yhdistyä positiiviseen ioniin. Tätä tapahtumaa kutsutaan rekombinaatioksi. Vapaiden varauksien määrä kaasussa riippuu siis varauksia synnyttävien ja poistavien mekanismien tasapainosta. [16]

Kaasun läpilyöntiprosessia voidaan kuvata kuvan 3.3 mukaisella kaasun virta-jännite-käyrällä, joka saadaan mitattua jännitettä hitaasti nostamalla ja kun kaasu on suljetussa putkessa. Kun kaasun yli kytketään jännite, virta kasvaa lähes lineaarisesti (alue 1), mikä johtuu siitä, että ulkoisen sähkökentän vaikutuksesta kaasussa olevat varauksenkuljettajat kulkeutuvat elektrodeille. Alueella 2 sähkökenttä on riittävän voimakas kuljettamaan kaikki kaasussa olevat vapaat varauksenkuljettajat elektrodeille ennen kuin ne rekombinoituvat. Tällöin virran kasvu pysähtyy kuvan mukaisesti. Tätä virran arvoa kutsutaan kyllästysvirraksi ja sen suuruus riippuu ainoastaan ulkopuolisista säteilylähteistä. Kun jännitettä edelleen kasvatetaan, saavat kaasun vapaat elektronit riittävästi energiaa törmäysten välissä ulkoiselta sähkökentältä, jotta ne voivat ionisoida atomeja ja molekyylejä. Tämän seurauksena virta alkaa kuvan mukaisesti (alue 3) kasvaa ja purkaus muuttuu itseään ylläpitäväksi. [16]

Jännitettä edelleen nostaessa kaasuun läpi kulkeva virta suurenee voimakkaasti ja tapahtuu läpilyönti. Kaasun paineen ollessa lähellä normaalipainetta, seuraa läpilyöntiä yleensä valokaaripurkaus (kuvassa alue 5). Kuvan alueen 4 mukaisia hohtopurkauksia saattaa esiintyä silloin, kun kaasun paine on pieni ja sähkökenttä on hyvin epähomogeeninen. Kuvan alueella 3 sijaitseva jännitteen huippuarvo on purkauksen syttymisjännite. Alueiden 4 ja 5 välissä olevaa jännitteen huippuarvoa ei välttämättä esiinny, koska kaaripurkaus voi alkaa suoraan ilman, että hohtopurkauksia esiintyy. [16]



Kuva 3.3. Kaasun virta-jännite-käyrä läpilyöntiprosessin aikana.

Townsendin purkausteoria perustuu edellä esitettyihin ionisaatioprosesseihin. Kun elektronilla on riittävästi sähkökentästä saatua energiaa, se voi ionisoida atomin tai molekyylin. Ionisaatioissa syntynyt uusi vapaa elektroni voi myös ionisoida atomin tai molekyylin ja näin ollen vapaiden elektronien määrä alkaa kasvaa nopeasti. Tätä tilannetta kutsutaan elektronivyöryksi. Townsendin ensimmäinen ionisaatiokerroin α ilmaisee, kuinka monta ionisoivaa sysäystä yksi elektroni kokee sähkökentässä kulkiessaan sähkökentän suuntaisesti. Paikassa x matkalla dx syntyneiden uusien elektronien määrä dn on näin ollen

$$dn = \alpha n(x) dx. \quad (3.4)$$

Koska ionisaatioon tarvittava energia vaihtelee eri aineilla, riippuu ionisaatiokerroin α vallitsevasta kaasusta, paineesta ja lämpötilasta. Vakio lämpötilassa Townsendin ensimmäinen ionisaatiokerroin noudattaa yhtälöä

$$\alpha = Ape^{-Bp/E}. \quad (3.5)$$

Yhtälössä A ja B ovat kaasulle ominaisia vakioita (ilmalle $A = 11,3 \text{ 1/Pa}\cdot\text{m}$ ja $B = 275 \text{ V/Pa}\cdot\text{m}$). Yhtälössä p on paine. Anodille tulevalle virralle pätee elektrodivälissä d

$$i = i_0 e^{\alpha d}. \quad (3.6)$$

Yhtälössä i_0 on katodilta liikkeelle lähteneiden elektronien aiheuttama virta (kuvassa 3.3 kyllästysalueen virta) [18, s. 307]. Elektronivyöryn aikana virta, kuten myös elektronien määrä, moninkertaistuu. Yhtälön (3.6) mukainen virran kertautuminen ei riitä selittämään läpilyöntiä. Yhtälön (3.6) mukaisesti virta voi kasvaa äärettömän suureksi vain, jos i_0 , α tai d kasvaa äärettömän suureksi. Näin ollen läpilyönnin selittämiseksi tarvitaan toinenkin ionisaatiomekanismi.

Elektrodivälissä syntyneitä vapaita elektroneja kohti syntyy elektrodivälissä myös positiivinen ioni. Positiiviset ionit ovat liian raskaita ionisoidakseen neutraaleja kaasumolekyylejä, mutta ne kulkeutuvat sähkökentän vaikutuksesta katodille, jossa ne voivat irrottaa elektroneja siihen osuessaan. Positiivisen ionin pitää irrottaa kaksi elektronia katodista, jotta se voi vapauttaa vapaan elektronin elektrodiväliin. Ensimmäinen elektroni menee positiivisen ionin neutraloimiseen ja toinen elektroni vapautuu elektrodiväliin. Ioni vapauttaa siis yhden vapaan elektronin elektrodiväliin, jos se pystyy luovuttamaan vähintään kaksi kertaa katodin pintamateriaalin ionisaatioenergian suuruisen energian osuessaan katodiin. [16]

Sekundäärinen ionisaatiokerroin γ kuvaa sitä todennäköisyyttä, jolla katodille saapuva positiivinen ioni irrottaa katodista vapaan elektronin elektrodiväliin. Koska tarvittava ionisaatioenergia vaihtelee materiaaleittain, kertoimen suuruus riippuu katodin materiaalista. Kun sekundäärinen ionisaatiokerroin otetaan huomioon, saadaan anodille saapuvalla virralle yhtälö

$$i = i_0 \frac{e^{\alpha d}}{1 - \gamma(e^{\alpha d} - 1)}. \quad (3.7)$$

Yhtälön (3.7) nimittäjä saa arvokseen nolla, kun

$$\gamma(e^{\alpha d} - 1) = 1. \quad (3.8)$$

Kun yhtälön (3.7) nimittäjä saa arvokseen nolla, anodille tuleva virta voi kasvaa äärettömän suureksi ja näin ollen kaasussa voi tapahtua läpilyönti.

3.2 Paschenin laki

Yhtälö (3.8) ilmaisee sähköisen läpilyönnin ehdon kaasulle, joka on kahden elektrodin välissä. Käytännön kannalta on selkeämpää, jos läpilyönnin ehto voidaan ilmoittaa suoraan kriittisen sähkökentän tai jännitteen avulla. Kun yhtälöön (3.8) sijoitetaan yhtälö

(3.5) ja lausutaan sähkökentän voimakkuus läpilyöntijännitteen ja elektrodivälin pituuden avulla, voidaan yhtälö kirjoittaa muotoon [16]

$$U_b = \frac{Bpd}{\ln \frac{Apd}{\ln(1+\frac{1}{\gamma})}}. \quad (3.9)$$

Saatua yhtälöä kutsutaan Paschenin laiksi ja se on voimassa vain niissä olosuhteissa, joissa läpilyönti tapahtuu edellä käsitellyllä Townsendin mekanismilla. Lain mukaan homogeenisessa elektrodivälissä läpilyöntijännite on vain kaasun paineen ja elektrodien välisen etäisyyden funktio. Läpilyöntijännite saa minimiarvonsa U_{bmin} , kun yhtälön nimittäjä saa arvokseen 1. Teoreettisesti tätä jännitettä pienemmillä jännitteillä läpilyönti ei ole mahdollinen kyseiselle kaasulle. Ilmalle kyseinen läpilyöntijännitteen minimi arvo on vaihtojännitteen huippuarvona 352 V. Pienissä elektrodiväleissä läpilyöntilujuus kasvaa, koska katodilta lähtevä elektroni vapauttaa vähemmän uusia elektroneja lyhyen matkan vuoksi. Tätä ilmiötä käsitellään lisää osittaispurkauksen yhteydessä luvussa 4.1.1. [16]

3.3 Streamer-purkaus

Sähköpurkaus voi tapahtua myös muunlaisella mekanismilla kuin Townsendin mekanismilla. Kun jännite, elektrodiväli tai kaasun paine on riittävän suuri, tapahtuu purkaus nopeudella, jota Townsendin mekanismi ei pysty selittämään. Lisäksi purkaus on kapea-alainen, mutta haarautuva sekä läpilyöntijännite ei riipu katodin materiaalista, kuten Townsendin mekanismilla tapahtuvassa purkauksessa. Purkausmekanismin selittää sähkökentän paikallinen epähomogenisoituminen, jonka purkaus aiheuttaa lähiympäristöönsä. Ilmiö esiintyy myös alun perin epähomogeenisissa sähkökentissä. Tällaista purkausta kutsutaan streamer-purkaukseksi. Koska ilmassa purkauksen edetessä purkauksen kärkeen muodostuu useita purkauskanavia huiskumaiseen muotoon, kutsutaan streamer-purkausta myös huiskupurkaukseksi. Streamer-purkauksen tapahtumiseksi elektrodeilla tapahtuva sekundäärinen vapaiden elektronien syntyminen ei ole välttämätöntä. Suurilla elektrodiväleillä (tyypillisesti yli 1 m) voi läpilyönti tapahtua myös leader-purkauksena. Leader-purkauksen käsittely sivutetaan tässä työssä sen vaatiman suuren elektrodivälin vuoksi. [16]

4 OSITTAISPURKAUKSET

Tässä luvussa käsitellään osittaispurkauksien syntymistä, luonnetta sekä mittaamista. Osittaispurkaus (engl. partial discharge) on sähköpurkaus, joka ei yhdistä elektrodiväliä [16]. Osittaispurkaus tapahtuu, kun sähkökentän voimakkuus ylittää eristysrakenteen jonkin osan sähkölujuuden. Luvussa 4.1 on käsitelty osittaispurkausilmiöitä. Osittaispurkauksiin liittyviä suureita on käsitelty luvussa 4.2 ja luvussa 4.3 on käsitelty osittaispurkauksien seurauksena tapahtuvaa eristeen vaurioitumista. Luvussa 4.4 on käsitelty osittaispurkauksien mittaamista ja havainnointia.

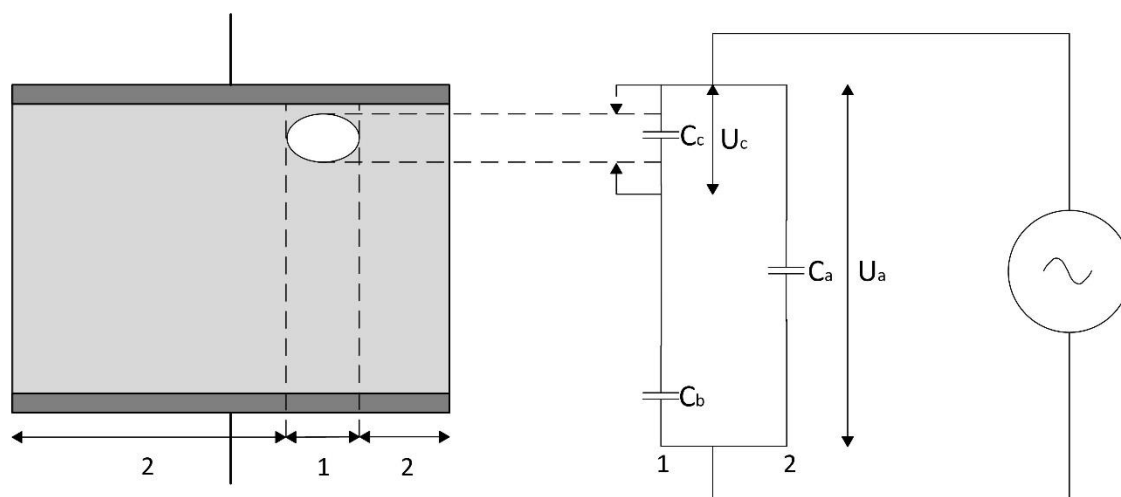
4.1 Osittaispurkausilmiöt

Osittaispurkauksia voi tapahtua kaasuissa, nesteissä, kiinteissä eristeissä sekä rajapinnoilla [19]. Osittaispurkauksia esiintyy kaikilla jännitemuodoilla eli osittaispurkaus voi tapahtua tasa-, vaihto- ja syöksyjännitteillä. Osittaispurkaukset voidaan luokitella usealla eri tavalla niiden esiintymispaikan mukaan. Tässä työssä osittaispurkaukset luokitellaan sisäisiin purkauksiin, pintapurkauksiin ja koronapurkauksiin. Eri osittaispurkaustyyppistä on käsitelty tarkemmin luvuissa 4.1.1–4.1.3.

4.1.1 Sisäiset osittaispurkaukset

Sisäisillä osittaispurkauksilla tarkoitetaan eristysrakenteen sisällä tapahtuvia osittaispurkauksia. Sisäisille osittaispurkauksille alttiita paikkoja eristysrakenteessa ovat: kaasuontelot eristeessä, ontelot eri eristekerrosten rajapinnalla tai eristeen ja metallin rajapinnalla sekä eristysrakenteessa olevan vieraan hiukkasen esimerkiksi metallihiukkasen ja varsinaisen eristeen rajapinnat. [16]

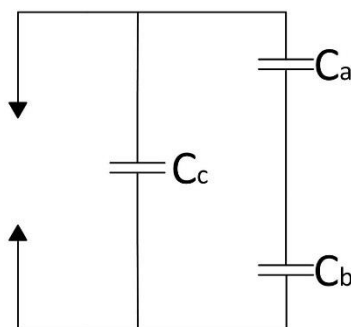
Osittaispurkausta pienessä ontelossa yksinkertaisessa eristysrakenteessa voidaan kuvata kolmikapasitanssimallilla kuvan 4.1 mukaisesti, koska osittaispurkaus tapahtuu ontelossa niin nopeasti, ettei ulkoinen piiri vaikuta ilmiöön [16].



Kuva 4.1. Eristysrakenteessa olevan kaasuontelon kolmikapasitanssimalli.

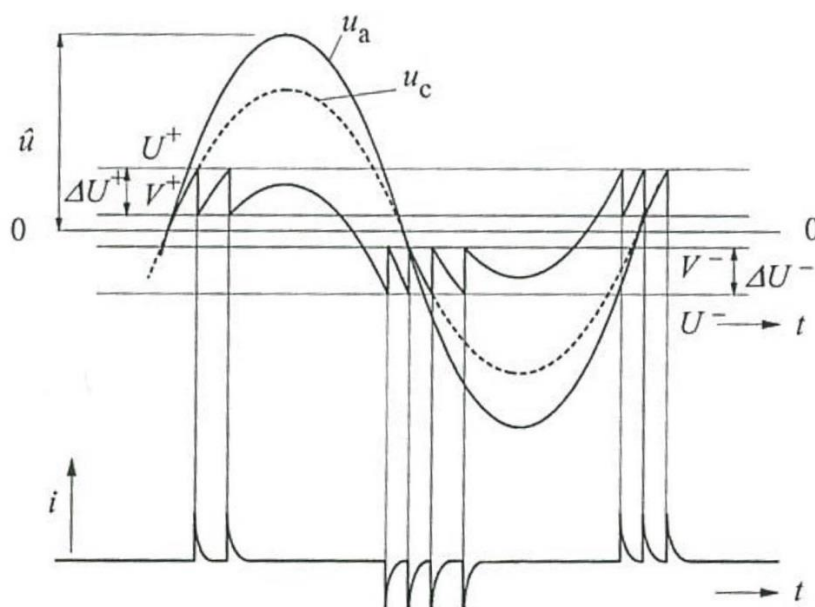
Kuvan 4.1 mukaisesti C_c on kaasuontelon, C_b on ontelon kanssa sarjassa olevan eristyksen ja C_a on koko eristysrakenteen kapasitanssi. Vaihtojännite jakautuu kääntäen verrannollisesti kapasitanssien suhteessa, jolloin kaasuontelon yli oleva jännite on verrannollinen koko eristysrakenteen yli olevaan jännitteeseen. Tavallisesti ontelossa vaikuttavan sähkökentän voimakkuus on suurempi kuin ympäröivässä eristeessä, mikä johtuu ilman pienemmästä suhteellisesta permittiviteetistä kuin ympäröivällä eristeellä. Kun eristysrakenteen yli olevaa jännitettä nostetaan, syttyy ontelossa purkaus tietyllä syttymisjännitteellä ja syntyvä purkaus siirtää osan varauksesta ontelon toiselle seinämälle, jolloin ontelon yli oleva jännite pienenee. Ontelon purkaus sammuu, kun ontelon jännite laskee sammumisjännitteen alapuolelle.

Jos ulkoinen piiri ei ehdi vaikuttamaan eli ulkoinen jännitelähde ei syötä osittaispurkausta, nopea jännitteen muutos jakautuu kaasuonteloa kuvaavasta kapasitanssista C_c katsottuna sen rinnalla olevan kapasitanssien C_b ja C_a muodostaman sarjakytken osien kesken kuvan 4.2 mukaisesti. Kapasitanssien C_b ja C_a suhteesta seuraa, että jännitteenmuutos tulee lähes kokonaan kapasitanssille C_b [16]. Ulkoinen jännitelähde korvaa nopeasti osittaispurkauksesta aiheutuneen suhteellisen pienen kokonaisjännitteen vajauksen, mikä näkyy virtapulssina eristysrakenteen liittimissä. Osittaispurkauksen sammumisen jälkeen ontelon yli oleva jännite jää sammumisjännitteen suuruiseksi ja ontelon kanssa sarjassa olevan kondensaattorin C_b jännite jää ontelon syttymisjännitteen verran alkuperäistä suuremmaksi [16].



Kuva 4.2. kolmikapasitanssimalli kaasuontelosta katsottuna.

Jos eristysrakenne on kytketty vaihtojännitelähteeseen, purkauksen sammumisen jälkeen kaasuontelon jännite alkaa seurata alkuperäisen kapasitiivisen jännitteenjaon mukaista vaihtojännitteen käyrää korjattuna varauksen muutosta vastaavalla sammumisjännitteen suuruusella tasajännitekomponentilla kuvan 4.3 mukaisesti [16]. Kuvasta nähdään myös, että purkauksen esiintymistiheys on suurin, kun jännitteen muutosnopeus on suurin eli nollakohdan molemmin puolin. Osittaispurkaukset eivät välttämättä esiinny säännöllisesti vaihtojännitteen jaksonaikana, vaan esimerkiksi ontelon muodosta johtuen syttymisjännitteet eri puolijaksoilla voivat olla erisuuruisia, jolloin myöskään osittaispurkaukset eivät tapahdu eri puolijaksoilla samoissa kohdissa. Joissakin tapauksissa ontelopurkauksia ei välttämättä esiinny toisella vaihtojännitteen puolijaksolla lainkaan.



Kuva 4.3. Osittaispurkauksien syntyminen, kun eristysrakenne on kytketty vaihtojännitelähteeseen. U^+ ja U^- ovat kuvassa osittaispurkauksen syttymisjännite ja V^+ sekä V^- ovat osittaispurkauksen sammumisjännite. Virta i on eristysrakenteen liittimissä näkyvä virtapulssi. [16]

Osittaispurkauksien syttymisjännite riippuu kaasuontelon rasituksesta eli kaasuontelossa vallitsevasta sähkökentän voimakkuudesta. Sähkökentän voimakkuus kaasuontelossa riippuu ympäröivästä sähkökentän voimakkuudesta, ontelon muodosta, ontelon suunnasta sekä ympäröivän eristeen suhteellisesta permittiviteetistä ε_r . Ontelon ollessa ohut ja kohtisuorassa sähkökenttään nähden sähkökentän voimakkuus ontelossa on ε_r -kertainen ympäröivään eristeeseen nähden. Jos ohuen ja kohtisuoraan sähkökenttään nähden olevan ontelon sähkökentänvoimakkuus tiedetään, voidaan ympäröivän eristeen sähkökentän voimakkuus laskea yhtälöllä

$$\bar{E}_e = \frac{\bar{E}_o}{\varepsilon_r}. \quad (4.1)$$

Yhtälössä \bar{E}_e on ympäröivän eristeen sähkökentän voimakkuus ja \bar{E}_o on ontelon sähkökentänvoimakkuus. Jos ontelo on pitkulainen ja ympäröivän sähkökentän suuntainen, sähkökentän voimakkuus ontelossa on suunnilleen sama kuin ympäröivässä eristeessä. Jos ontelo on pallomainen, sähkökentän voimakkuus ontelossa on $3\varepsilon_r/(1+2\varepsilon_r)$ kertainen ympäröivään sähkökentän voimakkuuteen verrattuna. [20]

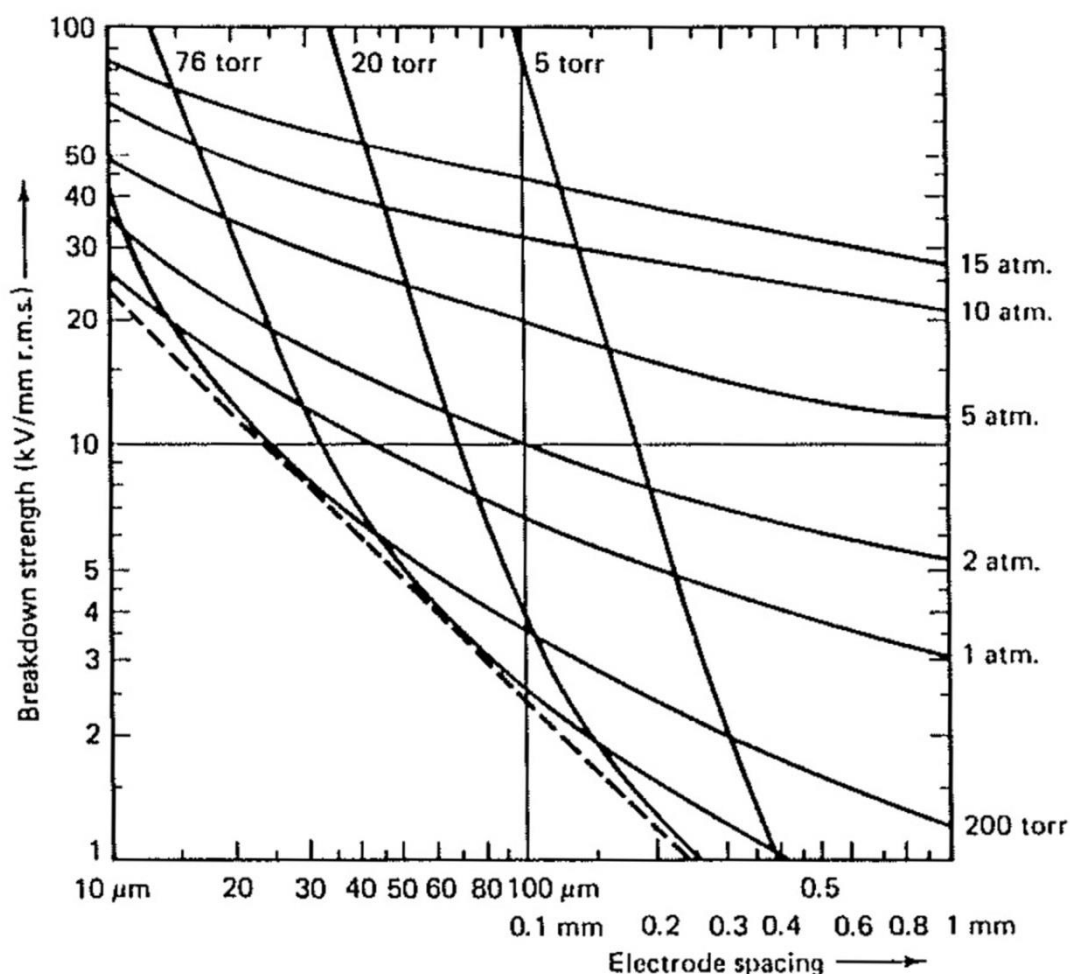
Eristysrakenteessa oleva ontelo käyttäytyy samankaltaisesti kuin metallielektrodeilla varustettu ontelo, joten purkauksen syttyminen ontelossa voidaan tarkastella Paschenin lain avulla [16]. Eristysrakenteen sisällä olevan ontelon kokoa ja muotoa ei yleensä tiedetä. Ontelossa oleva kaasu ja sen paine vastaa tietyllä viiveellä eristeen ympäristössä olevaa kaasua ja sen painetta. Tämä tarkoittaa sitä, että esimerkiksi pitkään normaalipaineisessa ilmassa olleen eristysrakenteen onteloissa on normaalipaineista ilmaa. Kun ontelossa oleva kaasu ja sen paine tiedetään sekä tehdään oletus ontelon koolle ja muodolle, voidaan ontelon syttymiskentänvoimakkuutta arvioida Paschenin lain avulla. [16]

Kuvassa 4.4 on esitetty ilman sähkölujuus elektrodien välisen etäisyyden funktiona. Kuvaajaa voidaan soveltaa myös ontelossa tapahtuvien osittaispurkauksien syttymisjännitettä arvioidessa, jolloin ontelon seinämät vastaavat elektrodia ja ontelon sähkökentän suuntainen paksuus vastaa elektrodien välistä etäisyyttä. Esimerkiksi jos ohut ja kohtisuoraan sähkökenttään nähden oleva ontelo on 100 μm paksu ja sähkökenttään nähden kohtisuorassa ja ympäröivän eristeen suhteellinen permittiviteetti on 2,2 ja ympäröivän ilman paine 1 atm [20, s. 4]. Tällöin kuvan 4.4 mukaisesti ontelossa olevan ilman läpilyöntilujuus on 6,8 kV/mm vaihtojännitteen tehollisarvona. Jos ontelossa vallitseva kentänvoimakkuus on ilman läpilyöntilujuuden rajalla, eristysrakenteessa oleva kentänvoimakkuus voidaan tällöin laskea yhtälöllä (4.1). Tällöin eristysrakenteessa olevaksi sähkökentän voimakkuudeksi saadaan

$$\frac{6,8}{2,2} \approx 3,09 \frac{\text{kV}}{\text{mm}}. \quad (4.2)$$

Polyeteenille suhteellinen permittiviteetti noin 2,2 ja laitteille, joiden eristysrakenteessa on käytetty polyeteeniä, eristysrakenteen sähköinen rasitus on yleensä

luokkaa 3,5–7 kV/mm vaihtojännitteen tehollisarvona [20, s. 4]. Polyeteenistä tehtyä eristysrakennetta ei voitaisi siis rasittaa sähköisesti normaalia määrää ilman, että eristysrakenteessa esiintyisi osittaispurkauksia, mikäli eristysrakenteessa olisi esimerkin mukainen ontelo. Joissakin tapauksissa syttymisjännite voi olla ennustettua pienempi. Esimerkiksi ontelon seinämät voivat olla peittyneenä staattisiin varauksiin, jotka ovat peräisin edellisistä purkauksista tai muodostuneet ontelon syntymisen yhteydessä. Edellä oleva tarkastelu pätee homogeenisille sähkökentille. Mikäli eristysrakenteessa oleva sähkökenttä on epähomogeeninen, ontelon syttymisjännite voi myös tässä tapauksessa olla ennustettua pienempi. [20]



Kuva 4.4 Ilman läpilyöntilujuus vaihtojännitteen tehollisarvona elektrodien välisen etäisyyden funktiona (johdettu Paschenin käyrästä) [20, s. 5].

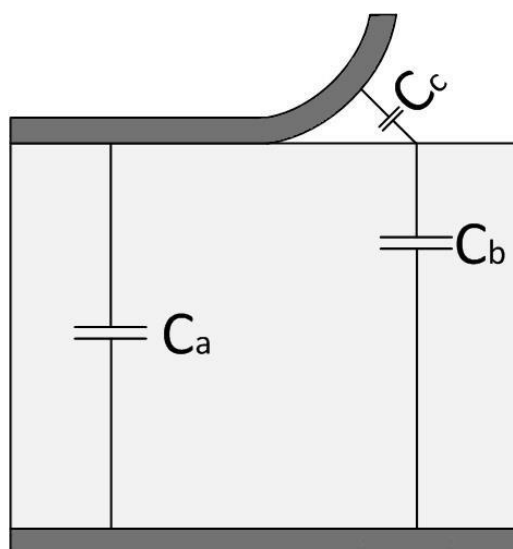
Tasajännitteellä sisäisiä- ja pintapurkauksia esiintyy lähinnä jännitteen muuttuessa [16]. Vakiotasajännitteellä tapahtuvat purkaukset on selitettävissä kolmikapasitanssimallin avulla, jolloin malliin pitää lisätä resistanssi kaikkien kolmen kapasitanssin rinnalle. Eristysrakenne johtaa koko ajan vähäisesti, mutta kuitenkin sen verran, että ontelo voi varautua tätä kautta, jolloin osittaispurkauksia voi tapahtua. Mikäli osittaispurkauksia esiintyy tasajännitteellä, ne ovat yleensä epäsäännöllisiä, mutta myös

säännölliset osittaispurkaukset ovat mahdollisia tasajännitteellä. Tällöin tasajännitteen pitää tavallisesti olla suurempi kuin vaihtojännite, jolla säännöllisiä osittaispurkauksia esiintyy [21]. Usein tasajännitteessä esiintyy kuitenkin aaltoilua eli tasajännitteen arvo vaihtelee, mutta ei vaihda polariteettiaan. Jos tämä tasajännitteen aaltoilukomponentti ylittää osittaispurkauksen syttymisjännitteen, osittaispurkauksia esiintyy aaltoilukomponentin laskevalla ja nousevalla osuudella, aivan kuten vaihtojännitteellä [20, s. 26].

Syöksyjännitteillä osittaispurkauksia esiintyy samaan tapaan kuin vaihtojännitteen puolijaksolla. Syöksyjännitteen rintaosalla tarkoitetaan syöksyjännitepulssin sitä osaa, jolloin pulssi ei ole vielä saavuttanut huippuarvoansa. Syöksyjännitepulssin selkäosalla tarkoitetaan vastaavasti huippuarvon jälkeistä osaa pulssissa. Syöksyjännitteen nopeasti nousevalla rintaosalla osittaispurkaus syttyy tavallisesti huomattavasti suuremmalla jännitteellä kuin vaihtojännitteellä, koska vyöryn aloittavan elektronin esiintymistodennäköisyys on pieni ja purkauksen kehittyminen vaatii siten aikaa. Kun purkaus kerran syttyy syöksyjännitteen rintaosalla, se sammuu yleensä vasta jännitehuipun jälkeen, jonka jälkeen seuraa useista vastakkaissuuntaisia purkauksia syöksyjännitteen selkäosalla. Jos syöksyjännitteen rintaosan nousunopeus on pieni, voi myös syöksyjännitteen rintaosalla tapahtua useita purkauksia.[16]

4.1.2 Pintapurkaukset

Pintapurkauksia voi syntyä, jos eristepinnan suuntaisesti vaikuttaa voimakas sähkökenttä. Pintapurkauksia voidaan tarkastella samalla tavoin kuin luvussa 4.1.1 käsiteltyjä eristysrakenteen sisäisiä osittaispurkauksia. Kuvassa 4.5 on esitetty kapasitanssimalli eristysrakenteelle, jossa pintapurkauksia voi esiintyä. Kuvassa tummanharmaalla olevat osat kuvaavat elektrodia ja vaaleanharmaalla olevat osat kuvaavat eristettä. Kuvan 4.5 mukaisesti pintapurkauksien yhteydessä ontelon kapasitanssi C_c korvataan voimakkaan sähkökentän alueen kapasitanssilla. [16]



Kuva 4.5. Pintapurkausten tarkastelu.

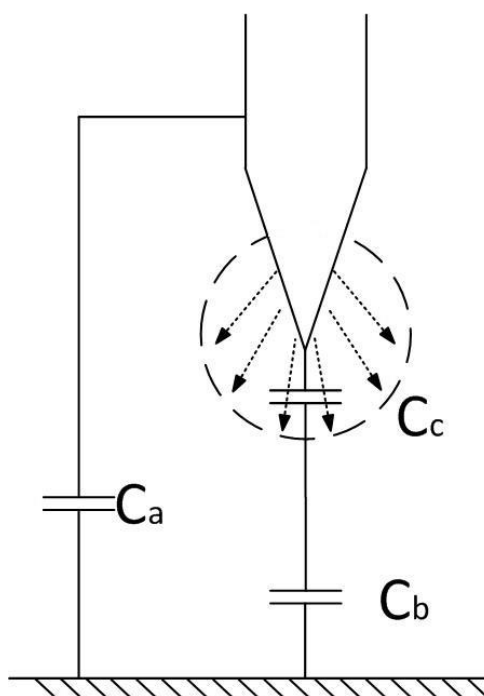
Liukupurkaus on eräs pintapurkauksen erittäin haitallinen muoto, joka on mahdollinen kuvan 4.5 mukaisessa eristysrakenteessa, jossa kahden eristeen rajapinnalla on voimakas rajapintojen suuntainen sähkökentän komponentti (kuvassa rajapinta on ilman ja vaaleanharmaan eristeen välillä). Kuvassa 4.5 eristeiden rajapintojen suuntainen sähkökentän komponentti aiheutuu tummanharmaasta kaartuvasta elektrodista. Liukupurkaus on erityisen haitallinen orgaanisille eristeille, eikä pitkäaikaisia liukupurkauksia voida sallia niissä. Pintapurkaukset ovat kuitenkin tavallisesti eristysrakenteelle vähemmän vaarallisia kuin sisäiset purkaukset, koska ne eivät keskity niin voimakkaasti tietylle alueelle [20, s. 147].

Jos oletetaan, että kuvassa 4.5 toinen eriste on ilmaa (kapasitanssi C_c), voidaan kapasitanssisuhteiden perusteella arvioida, että suurin osa eristysrakenteen yli olevasta jännitteestä tulee ilmapälin yli. Siten permittiviteeltään ja sähkölujuudeltaan heikommassa ilmassa syntyy helposti osittaispurkauksia huomattavasti pienemmällä jännitteellä verrattuna kiinteään eristeeseen. Jos jännitettä eristysrakenteen yli edelleen kasvatetaan, pidentyvät osittaispurkaukset eristysrakenteen rajapinnan suuntaisiksi liukupurkauksiksi. [16]

4.1.3 Koronapurkaukset

Koronalla tarkoitetaan ilmassa tai muussa kaasussa elektrodin pinnalla tapahtuvia osittaispurkauksia [16]. Korona on hyvin erilaista positiivisella ja negatiivisella jännitteellä, koska elektrodin ja tason välille syntyvä sähkökenttä on epähomogeeninen. Koronapurkauksia voidaan kuvata sisäisten- ja pintapurkausten tavoin kolmikapasitanssimallilla kuvan 4.6 mukaisesti, mutta koronapurkausten toistuvuutta ei voida mallin avulla havainnollistaa [16]. Vaihtojännitteellä korona syttyy ensin negatiivisella puolijaksolla, kun jännitettä nostetaan, koska kentänvoimakkuus on silloin suurempi avaruusvarauksien synnyn takia. Avaruusvarauksia syntyy, kun sähkökentän vaikutuksesta elektrodin läheisyydessä oleva kaasutila ionisoituu. Elektrodin jännitteen ollessa negatiivinen, ionisaatiossa syntyneet elektronit kulkeutuvat kohti anodia eli kuvan 4.6 mukaisesti kohti tasoa. Tällöin elektrodin välittömään läheisyyteen jää positiivisten ionien aiheuttama avaruusvaraus. Positiivisten ionien aiheuttama avaruusvaraus kasvattaa kentänvoimakkuutta elektrodin välittömässä läheisyydessä, jolloin koronapurkauksien todennäköisyys kasvaa. Jos elektrodissa on positiivinen jännite, kentänvoimakkuus elektrodin läheisyydessä pienenee hieman avaruusvarauksien ansiosta. [16]

Aluksi koronapurkauksia esiintyy vain yksi vaihtojännitteen jaksolla. Jännitettä nostettaessa purkausten lukumäärä lisääntyy, mutta niiden suuruus pysyy samana. Suurilla jännitteillä koronapurkauksia voi esiintyä tuhansia tai jopa miljoonia sekunnissa. Koronapurkaukset esiintyvät vaihtojännitteen jakson huippuarvon kohdalla, toisin kuin sisäiset- ja pintapurkaukset. Suurilla jännitteillä koronapurkauksia alkaa esiintyä myös positiivisella puolijaksolla, ja ne ovat suurempia ja epäsäännöllisempiä kuin negatiivisella puolijaksolla esiintyvät purkaukset. [16]



Kuva 4.6. Koronapurkaus.

Ilmassa tapahtuvat koronapurkaukset eivät ole tavallisesti eristeille vaarallisia, toisin kuin sisäiset ja pintapurkaukset. Koronapurkaukset voivat kuitenkin välillisesti vahingoittaa eristeitä, koska koronapurkauksien vaikutuksesta syntyy otsonia, mikä voi vahingoittaa eristettä. SF₆-kaasulla toteutetuissa eristysrakenteissa koronapurkaukset eivät ole sallittuja, koska koronapurkaukset muodostavat SF₆-kaasusta eristysrakenteelle erittäin haitallisia johdannaisia. SF₆-kaasulla toteutettuja eristysrakenteita käytetään lähinnä vain suurjännitejärjestelmissä sähkönjakelussa, eikä niitä näin ollen käsitellä tässä työssä tarkemmin. [20]

4.2 Osittaispurkaussuureet

Koska osittaispurkauksissa siirtyvä varaus on tavallisesti hyvin pieni, vain muutamista pikocoulombeista muutamaan sataan pikocoulombiin, ne eivät yleensä aiheuta heti merkittäviä vaurioita eristysrakenteelle vaan eristysrakenne vaurioituu hiljalleen, jolloin eristysrakenteen elinikä lyhenee. Osittaispurkauksilla on useita kemiallisia ja fysikaalisia vaikutuksia eristeisiin ja ympäristöön, jossa ne tapahtuvat. Osittaispurkauksia tarkastellessa yksittäisessä purkauksessa siirtyvä varaus olisi luonnollinen mitta yksittäisen osittaispurkauksen suuruudelle [16]. Yksittäisessä purkauksessa siirtyvää varausta ei kuitenkaan yleensä tunneta, eikä sitä voida mitata [16].

Tämän vuoksi osittaispurkauksen suuruuden mitaksi on valittu eristysrakenteen liittimissä näkyvä varauksen muutos eli osittaispurkauksen *näennäisvaraus*. Osittaispurkauksien näennäisvarauksen suuruus on siis se varaus, joka eristysrakenteeseen tuotuna aiheuttaa yhtä suuren jännitteen muutoksen kuin osittaispurkaus. Osittaispurkauksien näennäisvaraus on yleensä suhteellisen pieni, joten

näennäisvaraus ilmoitetaan yleensä pikocoulombeina (pC). Näennäisvarauksen käytön haittapuolena on, että eristysrakenteen ontelossa tapahtuvan osittaispurkauksen näennäisvaraus on kääntäen verrannollinen eristysrakenteen paksuuteen eli ohuella eristysrakenteella purkaus näyttää isommalta kuin paksulla. [16]

Näennäisvarauksen lisäksi osittaispurkauksien syttymis- ja sammumisjännitteet ovat olennaisia suureita osittaispurkauksia tarkastellessa. Syttymisjännitteellä U_i tarkoitetaan sitä eristysrakenteeseen vaikuttavaa jännitettä, jolla tietyn suuruisia tai suurempia toistuvia purkauksia havaitaan ensimmäisen kerran, kun jännitettä vähitellen nostetaan [16]. Sammumisjännitteellä U_e tarkoitetaan sitä eristysrakenteeseen vaikuttavaa jännitettä, jolla tietyn suuruisia tai suurempia purkauksia ei enää esiinny jännitettä pienennettäessä [16]. Osittaispurkauksien syttymis- ja sammumisjännitteet eivät ole siis täysin yksiselitteisiä, koska niille pitää määritellä purkauksen suuruus näennäisvarauksen avulla.

4.3 Eristeiden vaurioituminen osittaispurkauksen vaikutuksesta

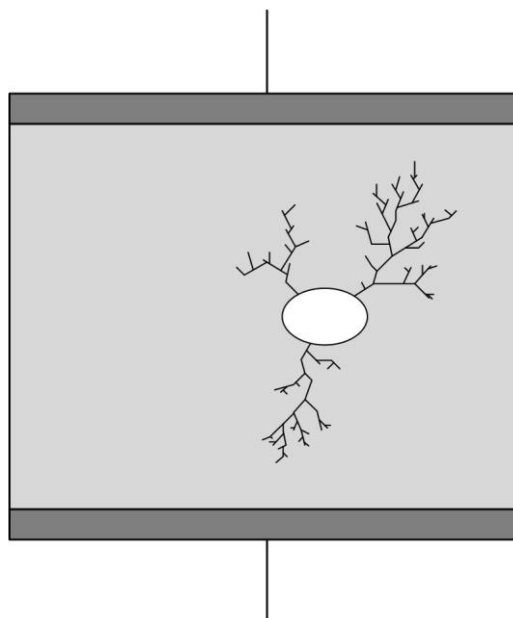
Sisäisten osittaispurkauksien aiheuttamaa polymeerien hajoamista on tutkittu laajasti [20, s. 144]. Polymeerillä tarkoitetaan materiaalia, jossa molekyylit koostuvat useista identtisistä molekyyleistä eli monomeereistä, jotka ovat liittyneet yhteen muodostaen yhden pitkän ketjun [22, s. 15]. Polymeerien vaurioitumisesta voidaan erottaa kolme eri vaiheita.

Ensimmäinen vaihe on yhtenäisen pinnan eroosio, joka voi johtua esimerkiksi lämpöhajoamisesta. Pinnan eroosio voi johtua myös osittaispurkauksista, koska elektronit jäävät loukkuun hieman pinnan alapuolelle, jolloin perättäisten osittaispurkauksien muodostamat ionit eivät pääse neutralisoimaan niitä. Tällöin sähkökentän voimakkuus pinnan yli kasvaa voimakkaasti ja pinnan sähköluku voi ylittyä ja tapahtuu pinnan eroosiota. [20]

Toisessa vaiheessa osittaispurkaukset alkavat keskittyä tiettyyn paikkaan. Mahdollisesti sen takia, että eristeen rasittuminen aiheuttaa mikrohalkeamia eristeen pinnalle. Tällöin syviä kuoppia alkaa muodostua eristeeseen, jolloin osittaispurkaukset keskittyvät entistä voimakkaammin näiden kuoppien alueelle. Kuoppien muodostuminen on sitä nopeampaa, mitä suurempi kentänvoimakkuus on, koska kentänvoimakkuus vaikuttaa osittaispurkauksien esiintymistiheyteen sekä ionien saamaan liike-energiaan [20, s. 147].

Kolmannessa vaiheessa edellisessä vaiheessa muodostuneen kuopan päässä sähkökentän voimakkuus ylittää eristeen sähkölukuuden muutamien mikrometrien matkalla, koska sähkökentän keskittyminen kuopan terävän kärjen ympärillä on voimakasta. Tällöin eriste hajoaa muutaman mikrometrin matkalta kärjen päästä ja sähkökentän keskittyminen siirtyy muodostuneeseen uuteen päähän ja tapahtuu uusi hajoaminen. Kun ilmiö toistuu joitakin kertoja, eristeeseen muodostuu nopeasti kapea kanava elektrodilta toiselle, mikä johtaa koko eristeen läpilyöntiin. Osittaispurkauksista

aiheutuvat kanavat eristeessä kulkevat harvoin suoraan elektrodilta toiselle, vaan kanavat pyrkivät muodostumaan puun oksiston rakennetta muistuttaviksi sähköpuiksi. Kuvassa 4.7 on esitetty eristeeseen kaasuontelossa tapahtuneiden osittaispurkauksien seurauksena muodostunut sähköpuu.



Kuva 4.7 Eristeeseen muodostunut sähköpuu.

Kaksi ensimmäistä vaihetta (ontelon seinämän eroosio ja kuoppien muodostuminen) kestää suurimman osan eristeen hajoamiseen kuluva ajasta. Tämä aika voi olla tunneista useisiin vuosiin. Kolmas vaihe, kanavien muodostuminen, voi kestää vain muutamia vaihtojännitteen jaksoja. Tämän takia sähköpuiden muodostumista on hankala havaita ennen eristeen läpilyöntiä. [20]

Eriste voi vaurioitua ja siinä voi tapahtua läpilyönti myös muiden ilmiöiden kuin osittaispurkauksen seurauksena, kuten muun muassa liiallisen lämpötilarasituksen, mekaanisen rasituksen tai muun ympäristöstä (esimerkiksi kosteus) johtuvan rasituksen seurauksena. Näiden ilmiöiden eristeeseen aiheuttamia vaurioita ja vauriomekanismeja ei käsitellä tarkemmin tässä työssä.

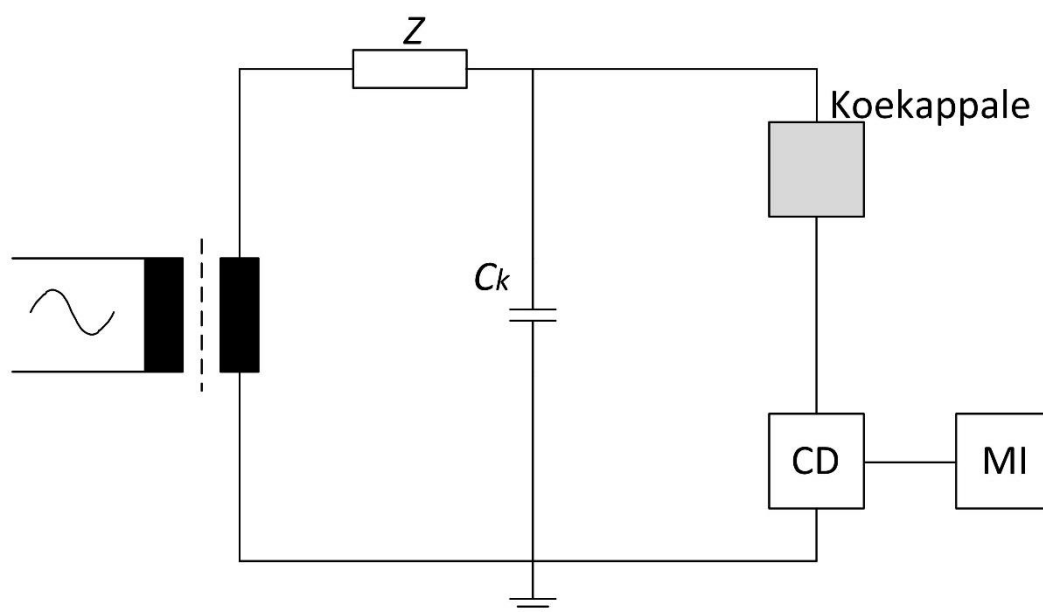
4.4 Osittaispurkauksien mittaaminen

Tavallisesti osittaispurkauksien mittaamisella pyritään varmistumaan siitä, että laitteen eristysrakenne täyttää sille asetetut laatuvaatimukset. Kuten edellisessä luvussa on esitetty osittaispurkaukset voivat vahingoittaa eristerakennetta, joten osittaispurkauksilla saattaa olla merkittävä rooli eristysrakenteen eliniän kannalta. Usein laitteiden eristysrakenteille asetetaan tietyt raja-arvot osittaispurkauksille. Raja-arvolla pyritään varmistamaan, että eristysrakenne kestää sille asetetun eliniän osittaispurkauksien kannalta. Osittaispurkauksien mittauksia käytetään myös eristeiden kunnonvalvonnassa, koska joissakin tapauksissa eristysrakenteen kunnon ja osittaispurkauksien ominaisuuksien

välillä voidaan löytää korrelaatiota [16]. Osittaispurkauksia voidaan mitata ja havainnoida useilla erilaisilla menetelmillä, joista yleisimpiä käsitellään seuraavissa luvuissa.

4.4.1 Osittaispurkausten sähköinen mittaus

Kuten luvussa 4.1 on esitetty, osittaispurkaukset esiintyvät virtapulsseina eristysrakenteen liittimissä. Osittaispurkausten sähköisessä mittauksessa nämä virtapulssit pyritään tunnistamaan, jolloin osittaispurkauksien suuruutta ja esiintymistiheyttä voidaan arvioida. Kuvassa 4.8 on esitetty eräs osittaispurkauksien mittauksessa käytettävä kytkentä, jossa mittaus tapahtuu samasta haarasta koekappaleen kanssa.



Kuva 4.8. Osittaispurkausten mittaus koekappaleen haarasta.

Kuvan 4.8 mukaisesti mittauskytkennässä tarvitaan jännitelähteen, koekappaleen ja mittausanturin lisäksi muitakin komponentteja. Kuvassa komponentti Z on kuristin. Kuristin ei ole mittauksien kannalta täysin välttämätön, mutta kuten luvussa 4.2 on esitetty, osittaispurkauksien aiheuttamat virtapulssit ovat hyvin pieniä, joten sähköverkosta mittauspiiriin kytkeytyvät häiriöt voivat olla niin suuria, että ne tekevät osittaispurkauksien mittaamisesta mahdotonta tai vähintäänkin epätarkkaa. Kuristimen tarkoituksena on estää häiriöiden kytkeytyminen sähköverkosta mittauspiiriin sekä toisaalta sulkea osittaispurkauspulsseilta pieni-impedanssinen virtatie jännitelähteen muuntajan käämikapasitanssien kautta maahan. [16]

Osittaispurkauksen aiheuttaman virtapulssin nousuaika on usein hyvin pieni: nanosekuntiluokkaa tai pienempikin. Tämän vuoksi osittaispurkauspulssin mittaamiseen tarvitaan hyvin suuri kaistanleveys, jopa yli 1 GHz, mikäli pulssi halutaan toistaa oikean muotoisena. Tavallisesti mittaamiseen käytetään kuitenkin paljon pienempää

kaistanleveyttä 100–400 kHz, jolla purkauksen näennäisvaraus q saadaan mitattua oikein jäljempänä luvussa käsiteltävän kalibroinnin avulla. [16; 23]

Toinen mittaussiirin kannalta olennainen komponentti on kytkentäkondensaattori C_k . Kytkentäkondensaattorin tulee olla osittaispurkauksista vapaa, jotta kondensaattorissa tapahtuvat osittaispurkaukset eivät aiheuta virhettä koekappaleen osittaispurkauksien mittaamiseen. Lisäksi kytkentäkondensaattorin tulee olla pieni-induktanssinen, koska kondensaattori helpottaa osittaispurkauksien synnyttämien virtapulssien kulkemista. Paras herkkyys mittauksissa saavutetaan, kun kytkentäkondensaattorin kapasitanssi on samaa luokkaa koekappaleen kapasitanssin kanssa.

Kuvassa 4.8 mittaus tapahtuu koekappaleen kanssa samasta haarasta, joten mittausanturi (coupling device CD) on sijoitettu sarjaan koekappaleen kanssa. Mittausanturi voi olla RC-piiri, RLC-piiri, pulssimuuntaja tai erityinen mittamuunnin, jolla osittaispurkauksen aiheuttama virtapulssi muunnetaan jännitepulssiksi. RC-piiri muodostaa värähtelemättömän pulssin, mutta sitä ei voi kuitenkaan käyttää anturina suurilla koekappaleen kapasitansseilla, koska koekappaleen suuresta virrasta johtuva koejännitteen taajuinen komponentti voi olla mittauslaitteille vaarallisen suuri. RLC-piirissä kondensaattorin ja vastuksen rinnalle tuodaan vielä induktanssi L , jonka impedanssi on pieni käyttötaajuisella virralla ja suuri osittaispurkauspulssien taajuuksilla. Näin ollen piirin muodostama käyttötaajuinen komponentti on pieni ja osittaispurkauspulssi erottuu selvemmin. Induktanssi L voi aiheuttaa kuitenkin pulssin värähtelyä, mikä voidaan vaimentaa piirin rinnakkaisresistanssin R avulla. Myös pulssimuuntajan mitoitus voidaan tehdä niin, että sen impedanssi on käyttötaajuisella virralla pieni ja osittaispurkauspulssien suurilla taajuuksilla suuri. Pulssimuuntajan, kuten muidenkin mittausantureiden, mitoitus riippuu mittaushaaran kapasitanssista sekä virrasta. [16]

Jännitepulssi viedään mittaускаapelia tai optista linkkiä pitkin mittausinstrumentille (MI), joka voi olla oskilloskooppi, analysaattori tai erityinen osittaispurkauksen mittauslaite [16]. Mittauskaapelin sijasta optista linkkiä käytetään, kun halutaan galvaaninen erotus mittausanturin ja mittalaitteen välille. Galvaaninen erotus voidaan tarvita muun muassa turvallisuussyistä.

Kuvassa mittausanturi on sijoitettu koekappaleen ja maan väliin, mutta joissakin tapauksissa mittausanturi voidaan sijoittaa myös suurjännitepuolelle. Tällöin mittausanturi kytketään suodinpiirin jälkeen joko kytkentäkondensaattorin tai koekappaleen haaraan. Mittausanturi voidaan kytkeä myös kytkentäkondensaattorin haaraan maanpuolelle. Koekappaleesta ja kytkentäkondensaattorista riippuu, kummasta haarasta mittaus on tarkempaa [16]. Mittaus voidaan suorittaa myös molemmista haaroista yhtä aikaa, joka tarjoaa mahdollisuuksia häiriöiden eliminoimiseen ja sitä kautta tarkempia mittaustuloksia [16].

Osittaispurkausmittauksen herkkyys on keskeinen tekijä mittausten onnistumiselle, ja sillä tarkoitetaan pienintä osittaispurkauksen näennäisvarausta, joka voidaan luotettavasti havaita. Toinen mittausten tarkkuuteen liittyvä suure on resoluutio, jolla tarkoitetaan suurinta havaittavaa osittaispurkauspulssien määrää yhdessä siniaallon

neljänneksessä [20, s. 76]. Käytännössä herkkyys ilmenee mittauslaitteessa näkyvän osittaispurkaussignaalin erottumisena häiriötasosta. Mittauspiirin aiheuttama lämpökohina rajoittaa pienintä mahdollista herkkyyttä, joka mittauspiirillä voidaan saavuttaa [20, s. 93]. Käytännössä herkkyyttä heikentävät myös mittauspiiriin kytkeytyvät ulkoiset häiriöt, joiden kytkeytymistä mittauspiiriin ei voida kokonaan estää kuristimesta ja muista menetelmistä huolimatta. Jos mittauksen herkkyys on esimerkiksi 1 pC, on 1 pC näennäisvaraus pystyttävä ilmaisemaan luotettavasti. Standardin IEC 60270 mukaan häiriötason tulisi olla pienempi kuin 50 % mittauksessa sallitun osittaispurkauksen suuruudesta, mikäli relevantti tekninen komitea ei ole kyseiselle mittaukselle muutoin määrittänyt [23, s. 55]. Tarvittava mittauksen herkkyys riippuu usein mitattavasta laitteesta ja mittauksen luonteesta. Kaapelin tyyppitestauksessa tarvittava herkkyys on 5 pC, mutta elinikä tutkimuksissa tarvittava mittauksen herkkyys voi olla alle 0,1 pC. Saavutettavissa oleva herkkyys riippuu testattavasta koekappaleesta sekä testauspaikasta: esimerkiksi tehdasympäristössä ei yleensä päästä yhtä suureen herkkyyteen kuin huolellisesti eristetyssä laboratorioympäristössä. [16]

Häiriöt mittauksessa voivat johtua mittauksen ympäristöstä kytkeytyvistä häiriöistä tai mittauspiirin itsensä aiheuttamista häiriöistä. Edellä mainittujen mittauspiirin itsensä aiheuttamien häiriöiden lisäksi mittauspiirissä voi esiintyä myös koronapurkauksia, joka aiheuttaa epätarkkuutta mittauksiin. Koronan välttämiseksi tulee mittauksissa käyttää pyörästettyjä elektrodeja sekä halkaisijaltaan riittävän suuria johtimia. Mittauspiirin ulkopuolisia häiriöitä ovat muun muassa ympäristön sähkömagneettiset kentät sekä sähköverkon kautta siirtyvät häiriöt. Sähköverkon kautta siirtyvien häiriöiden vuoksi mittauspiirissä tarvitaan suojimia hyvän herkkyyden saavuttamiseksi, kuten edellä on esitetty.

Ympäristön sähkömagneettisten kenttien takia mittauksen tulee yleensä olla sähkömagneettisesti suojattu. Käytännössä tämä tarkoittaa Faradayn häkin rakentamista mittauksen ympärille. Hyvä Faradayn haki koostuu kahdesta kerroksesta: magneettinen kerros (esimerkiksi terästä) matalataajuuksisia häiriöitä vastaan ja johtava kerros (esimerkiksi kuparia) korkeataajuuksisia häiriöitä vastaan [20, s. 95]. Myös vapaassa potentiaalissa olevat metalliesineet voivat aiheuttaa häiriöitä mittaukseen, koska mittauksissa syntyvä sähkökenttä kytkeytyy niihin. Kentänvoimakkuus voi helposti nousta niin suureksi, että näissä syntyy mittauksen häiritseviä osittaispurkauksia. Tämän vuoksi mittauksessa olevat metalliesineet on joko poistettava tai ne on maadoitettava. Monen eri maadoituspisteen käyttäminen voi aiheuttaa vakavia häiriöitä mittauksessa, koska yhteismuotoisille häiriöille voi tällöin muodostua virtareitti, ja siksi huolellisesti tehtyä yhden pisteen maadoitusta tulee käyttää mittauspiirille ja mittalaitteille [20, s. 96]. Eräs hyvä tapa varmistua mittauspiirin häiriö- ja osittaispurkausvapaudesta on kytkeä koekappaleeksi ensin kappale, joka tiedetään osittaispurkauksettomaksi ja katsoa havaitaanko mittauksissa osittaispurkauksia [20, s. 97]. Edellä olevan perusteella voidaan todeta, että suuren mittausherkkyyden saavuttaminen vaatii huomattavasti työtä ja järjestelyitä. [16]

Osittaispurkausmittausten kalibrointi on hyvin olennainen osa mittauksia. Kun normaalisti mittausjärjestelmät kalibroidaan suunnilleen kerran vuodessa, osittaispurkausmittausjärjestelmä pitää kalibroida joka kerta, kun sitä käytetään. Tämä johtuu siitä, että vähäinenkin muutos mittauspiirissä tai koekappaleen kapasitanssissa muuttaa mittauslaitteen näyttämän osittaispurkauksen suuruuden ja todellisen osittaispurkauksen suuruuden suhdetta eli skaalauskerrointa. Skaalauskerroin voidaan määrittää laskennallisesti, mutta se on työlästä sekä epätarkkaa, koska kaikkia määrittämiseen tarvittavia suureita ei voida luotettavasti mitata. Etenkin hajakapasitanssien määrittäminen on vaikeaa ja niillä on suuri merkitys skaalauskertoimeen. [16]

Skaalauskerroin voidaan kuitenkin luotettavasti ja yksinkertaisesti mitata. Skaalauskerroimen mittaamista varten tarvitaan erityinen osittaispurkauskalibraattori. Yksinkertaisimmillaan kalibraattori voi olla askeljännitegeneraattori, joka kytketään pienen kapasitanssin välityksellä koekappaleen rinnalle. Kun askeljännitegeneraattorin jännite muuttuu määrällä U_0 , muuttuu kalibraattorin varaus yhtälön (4.3) mukaisesti.

$$q_0 = CU_0 \quad (4.3)$$

Yhtälössä C on kapasitanssi, jolla askeljännitegeneraattori kytketään koekappaleeseen. Esimerkiksi jos $C = 10$ pF ja $U_0 = 1$ V tulee varauksenmuutokseksi 10 pC. Jyrkän jännitepulssin aikana kondensaattori varautuu ja virta kulkee koekappaleen ja mittauspiirin läpi. Nämä virtapulssit edustavat koekappaleessa tapahtuvia osittaispurkauspulseja ja näin ollen kalibrointigeneraattori aiheuttaa mittausanturissa yhtä suuren jännitteen muutoksen kuin koekappaleessa tapahtuva osittaispurkaus, jonka näennäisvaraus on q_0 . Koska näennäisvaraus q_0 tässä tapauksessa tunnetaan ja pulssin aiheuttama jännitteenmuutos nähdään mittauslaitteesta, voidaan skaalauskerroin näin ollen määrittää.

Osittaispurkausmittauksen aikana koekappaleessa voi esiintyä useita erisuuruisia osittaispurkauksia. Tämä vuoksi vaihtojännitteellä tehtävissä osittaispurkausmittauksissa mittaustuloksena ilmoitettava osittaispurkauksen näennäisvarauksen suuruus on suurin toistuva osittaispurkaus testin aikana [23, s. 19].

4.4.2 Osittaispurkausten ei-sähköinen havaitseminen

Sähköisen mittauksen lisäksi osittaispurkauksia voi havaita myös ei-sähköisin keinoin. Osittaispurkaukset aiheuttavat monenlaisia ilmiöitä eristysrakenteessa, kuten kemiallisia muutoksia, kaasun paineen muutoksia, lämpöä, ääntä ja valoa [20, s. 36]. Osittaispurkauksien havaitsemisen kannalta lähinnä vain purkauksien aiheuttama ääni ja valo ovat käytännöllisiä keinoja. Ei-sähköisten havaitsemiskeinojen avulla ei voida mitata osittaispurkauksien suuruutta, mutta ne ovat erittäin hyödyllisiä osittaispurkauksien paikantamisessa ja havaitsemisessa [20].

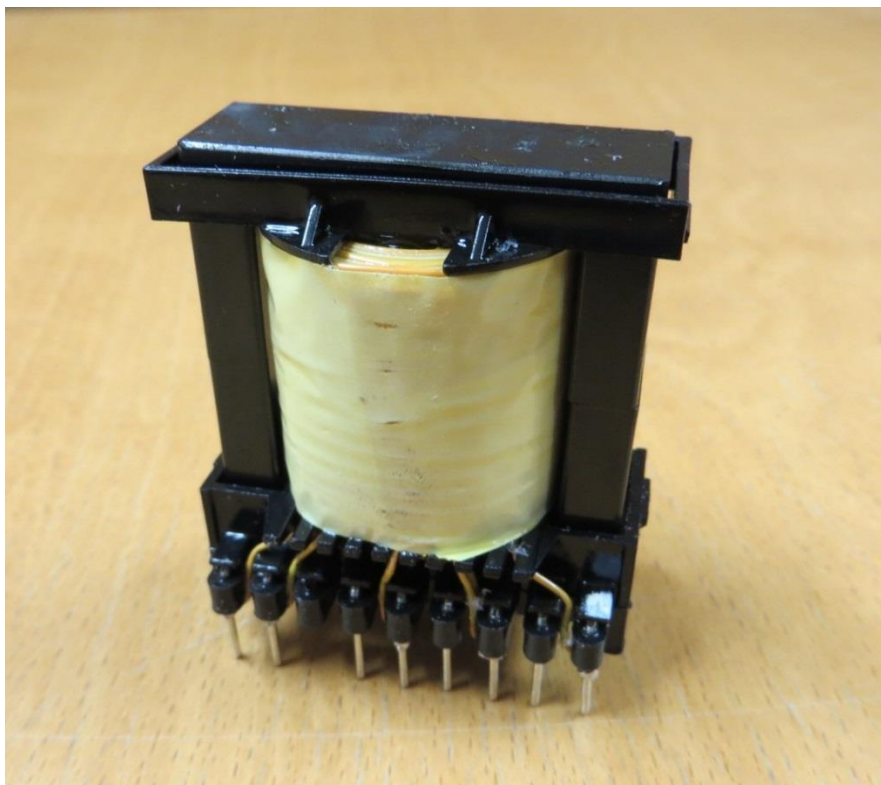
Akustiset osittaispurkauksien paikannusmenetelmät perustuvat purkausten aiheuttamaan ääneen. Etenkin korona- ja pintapurkaukset ovat hyvin havaittavissa akustisilla menetelmillä. Korvalla kuuntelemalla voidaan havaita muutaman sadan pikocoulombin suuruisia osittaispurkauksia, mutta parempiin tuloksiin päästään käyttämällä ultraäänitaajuuksia, joilla osittaispurkauksien intensiteetti on merkittävä. Tavallisesti ultraäänipaikannuksessa käytetään melko kapeaa taajuuskaistaa: noin 30–50 kHz, joka on hieman kuuloalueen yläpuolella. [20]

Ultraäänipaikannuslaitteita on muutamia erityyppisiä. Eräs laite käyttää heijastinlautasta, jonka polttopisteessä on ultraäänianturi. Laite muuttaa havaitun ultraäänen kuultavaksi ääneksi ja sen suuruus voidaan lukea desibelimittarilla. Jopa muutaman pikocoulombin suuruisia osittaispurkauksia voidaan havaita tällaisella laitteella, mutta laitteella ei välttämättä saada kovin hyvin paikannettua osittaispurkauksien syntymiskohtaa. Käyttämällä 1–2 metriä pitkiä ja muutaman sentin sisähalkaisijaltaan olevia muoviputkea, jonka päässä on ultraäänianturi, saadaan osittaispurkauksien suunta mitattua huomattavasti paremmin. Putki toimii suojana ei-haluttua ääntä vastaan ja ääni pääsee putken sisään ainoastaan sen päästä, jolloin suuntaherkkyys on erittäin hyvä. Kun ultraääniantureita kiinnitetään eri puolille koekappaletta, voidaan osittaispurkauksien sijainta määrittää äänen voimakkuuden ja kulkuajan perusteella. Osittaispurkauksen seurauksena syntymä ääniaalto kulkee melko suoraan eristysrakenteen ja muiden väliaineiden läpi purkauskohdasta anturiin. [20]

Osittaispurkauksien havaitseminen niiden lähettämän valon avulla onnistuu pinta- ja koronapurkauksien yhteydessä. Parhaiten osittaispurkauksien havaitseminen niiden lähettämän valon avulla onnistuu pimeässä tilassa kuvaamalla näkyvää tai ultraviolettivaloa. Kuvaamalla pienimmät havaittavat osittaispurkaukset voivat olla noin 1 pC suuruisia. Osittaispurkaukset voidaan havaita paljaalla silmälläkin, mutta tällöin pienin havaittava osittaispurkaus on luokkaa 500–1000 pC. Kuvaamalla tapahtuva osittaispurkauksien paikannus on erittäin tarkkaa ja monessa tilanteessa parempi kuin mikään muu havainnointitapa. [20]

5 FLYBACK-MUUNTAJAN RAKENNE JA VALMISTUSMATERIAALIT

Tässä luvussa käsitellään flyback-hakkurin muuntajan rakennetta ja valmistusmateriaaleja, joka on yleisellä tasolla esitelty luvussa 2.3. Kuvassa 5.1 on esitetty eräs flyback-muuntaja.

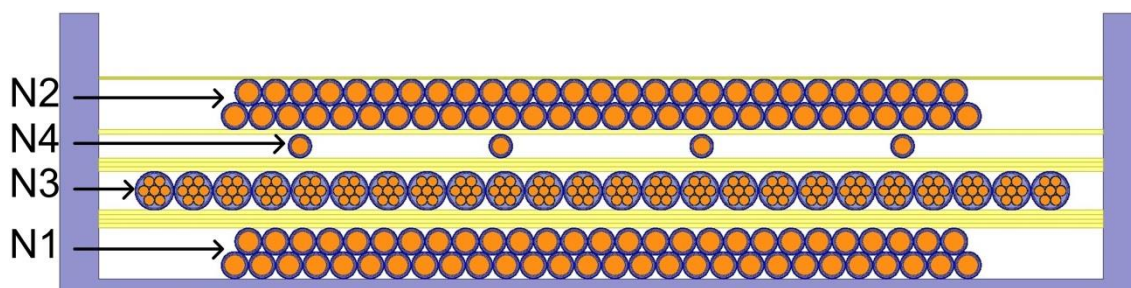


Kuva 5.1. Flyback-hakkurin muuntaja.

Tässä työssä käsiteltävät muuntajat tehdään samalle kelarungolle kuin kuvan 5.1 muuntaja, joten kaikki tässä työssä käsiteltävät muuntajat ovat lähes samankokoisia. Yksi tapa estää osittaispurkauksia olisi tehdä eristysrakenteesta paksumpi eli tehdä muuntajasta isompi, jolloin käämien välisen etäisyyden ansiosta eristysrakenteessa esiintyvät kentänvoimakkuudet laskee ja näin ollen osittaispurkauksien syttymisjännite kasvaa. Tässä työssä osittaispurkauksia ei pyritä välttämään muuntajan kokoa kasvattamalla, vaan eristysrakennetta pyritään optimoimaan siten, että osittaispurkauksien syttymisjännite kasvaa. Muuntajan eristyspaksuuksien kasvattamisella olisi useita haittapuolia.

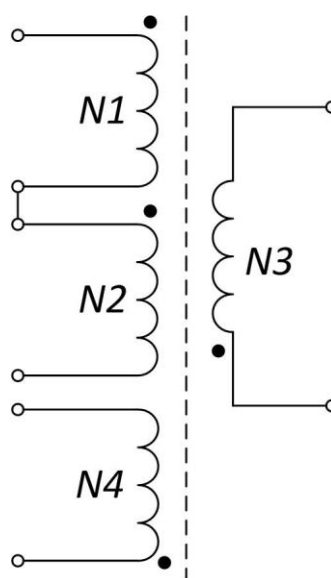
Eristysrakenteen paksuntamisen seurauksena muuntajan kelarunkoa jouduttaisiin ennen pitkään suurentamaan, jotta käämit ja eristeet mahtuisivat edelleen muuntajasydämen sisäpuolelle kuvan 5.1 mukaisesti. Isomman kelarungon seurauksena

muuntaja veisi suuremman tilan piirikortilla. Suuremman eristyspaksuuden seurauksena myös luvussa 2.3 esitelty hajainduktanssi kasvaa, minkä seurauksena hakkurin kytkimelle aiheutuu suurempia jännitepiikkejä ja hakkurin hyötysuhde laskee, mikäli hajainduktanssin aiheuttamaan hajavuohon varastoitunutta energiaa ei pystytä kierrättämään. Kuvassa 5.2 on esitetty tässä työssä käsiteltävän flyback-hakkurin muuntajan periaatteellinen poikkileikkaus.



Kuva 5.2. Flyback-hakkurin muuntajan periaatteellinen poikkileikkaus.

Kuvassa 5.2 käämit N1 ja N2 ovat ensiökäämejä. Kyseissä muuntajassa ensiökäämi on jaettu kahteen osaan ja muut käämit ovat sijoitettu näiden ensiökäämien väliin. Tämä parantaa ensiökäämien magneettista kytkeytymistä apukäämiin N4 sekä toisiokäämiin N3. Magneettisen kytkeytymisen parantuminen pienentää hajainduktanssia. Kuvassa 5.3 on esitetty kuvan 5.2 mukaisen muuntajan käämien kytkennät.



Kuva 5.3. Kuvan 5.2 mukaisen flyback-hakkurin muuntajan käämien kytkennät.

Osittaispurkauksien kannalta ensiökäämi kannattaisi tehdä yksiosaisena, jolloin ensiökäämin ja toisiokäämin välille voitaisiin laittaa enemmän eristettä kuin tilanteessa, jossa ensiökäämi on jaettu kahteen osaan kuvan mukaisesti. Ensiö- ja toisiokäämin kasvaneen etäisyyden vuoksi sähkökentän voimakkuudet eristysrakenteessa laskisi,

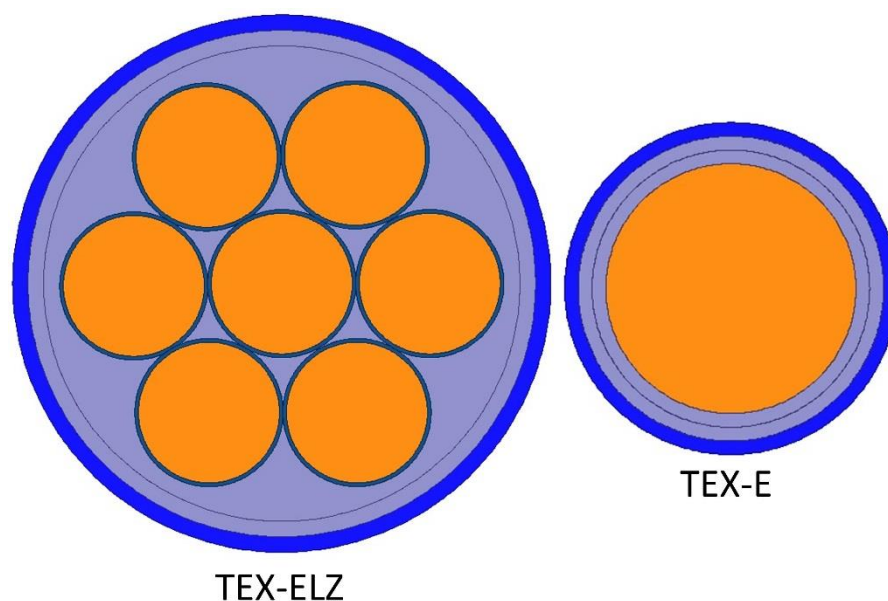
jolloin osittaispurkauksien esiintymistodennäköisyys pienenisi. Tässä tapauksessa yksiosaisen ensiökäämi aiheuttaa kuitenkin niin suuren hajainduktanssin, että ensiökäämin sijoittamista yhteen osaan ei käsitellä ratkaisuna tässä työssä.

Apukäämissä N4 kulkee suhteellisen pieni virta verrattuna ensiö- ja toisiokäämeihin, koska apukäämillä ylläpidetään pääasiassa vain PWM-ohjaimen käyttöjännitettä (V_{cc} kuvassa 2.14). Pieni virta aiheuttaa suhteellisen pienen hajavuon, vaikka käämien välinen kytkeytyminen olisikin huonoa, minkä vuoksi apukäämin hyvä kytkeytyminen ensiökäämiin ei ole niin tärkeää kuin ensiökäämin kytkeytyminen toisiokäämiin. Tämän vuoksi apukäämi voitaisiin sijoittaa myös muualle kuin ensiökäämien väliin eli käämien N2 ja N3 tai N1 ja N3 väliin. Käytännössä tämä tarkoittaisi kuvan 5.2 tapauksessa apukäämin sijoittamista käämin N1 alle tai käämin N2 päälle. Tällöin sähkökentän voimakkuudet apukäämin N4 ja toisiokäämin N3 välillä pienenevät kasvaneen etäisyyden takia ja lähtökohtaisesti osittaispurkauksien esiintymistodennäköisyys pienenee.

Koska ensiökäämin puolikkaiden ja toisiokäämin välillä esiintyy suurempia huippujännitteitä, osittaispurkauksien esiintymistodennäköisyys on suurempi niiden kuin apukäämin ja toisiokäämin välillä. Tämän vuoksi tässä työssä ei käsitellä apukäämin paikan vaikutusta osittaispurkauksien syntymiseen, vaan se pidetään luvun 6 simuloinneissa kuvan 5.2 mukaisella paikalla. Tässä työssä osittaispurkauksien syntyminen pyritään estämään vaikuttamalla eristysrakenteen materiaaleihin ja käytettyihin johtimiin, joita on käsitelty luvuissa 5.1 ja 5.2. Edellä olevien lisäksi muuntajan kokonaispaksuuteen voidaan vaikuttaa myös käämikierrosten ja johtimien poikkipinta-alojen valinnalla, mutta tämä ratkaisu rajataan pois työssä käsiteltävistä osittaispurkauksien välttämiskeinoista, koska käämikierrokset ja johtimien poikkipinta-alat ovat hyvin muuntajakohtainen ratkaisu.

5.1 Johtimet

Tässä luvussa käsitellään tavallisimmat flyback-muuntajissa käytettävät johdintyyppit. Kuvassa 5.4 on esitetty periaatteellinen poikkileikkaus Furukawan valmistamasta TEX-ELZ ja TEX-E johtimesta [24].



Kuva 5.4. TEX-ELZ ja TEX-E johtimet.

Kuvan 5.4 mukaisesti TEX-E johtimessa on 3 eristekerrosta, josta seuraa nimitys TIW-johdin (engl. Tripe Insulated Wire). Kuvassa vaaleammalla sinisellä olevat kaksi ensimmäistä eristekerrosta ovat muokattua polyesteriä ja tummemmalla sinisellä oleva ylin eristekerros on polyamidia [24]. Furukawa ilmoitti muokatun polyesterin suhteelliseksi permittiviteetiksi noin 3,5 ja polyamidin suhteelliseksi permittiviteetiksi noin 4–4,5. Johtimen eristekerroksen paksuus pysyy samana, vaikka kuparin halkaisijaa muutetaan, joten pienillä johtimen halkaisijoilla eristekerroksien paksuus muodostaa isomman osan johtimen kokonaishalkaisijasta. Furukawa arvioi yhden eristekerroksen paksuudeksi noin 33 μm , joten jokaiselle TEX-E johtimelle eristekerroksen paksuus on noin 99 μm . Liitteessä A on esitetty TEX-E johtimen mitat eri johtimen paksuuksille. Johtimen mitkä tahansa kaksi eristekerrosta kestävät 3000 V vaihtojännitettä minuutin ajan [24].

TEX-ELZ johdin on Litz-tyyppinen johdin. Litz-johtimella tarkoitetaan, kuvan mukaisesti, useammasta toisistaan eristetyistä säikeistä koostuvaa johdinta, jossa johtimet ovat kierretty. Litz-johdinta käytetään korkeilla vaihtosähkön taajuuksilla, jolloin virranahdo muodostuu ongelmaksi. Virranahdolla tarkoitetaan vaihtovirran taipumusta kulkea johtimen pinnalla suurilla taajuuksilla sen sijaan, että virrantiheys jakaantuisi tasaisesti koko johtimen paksuuteen. Tämän seurauksena johtimen näennäinen resistanssi nousee suurilla taajuuksilla, koska virta käyttää johtimen pinta-alasta vain pienen osan. Litz-johtimessa virta ahtautuu suurilla taajuuksilla yhden kuparisäikeen sijasta usean kuparisäikeen pinnalle, kuvan 5.4 tapauksessa seitsemän, jolloin johtimen näennäinen resistanssi ei kasva niin merkittävästi suurilla taajuuksilla.

TEX-ELZ johtimessa kuvan vaalean siniset eristekerrokset ovat muokattua polyesteriä ja tummemman sininen eristekerros polyamidia, kuten TEX-E johtimen tapauksessa ja eristekerroksien minimipaksuudet ja muut ominaisuudet ovat myöskin samat kuin TEX-E johtimella. TEX-ELZ johtimessa on kuitenkin vielä ohut eristekalvo

neljäntenä eristekerroksena kuparisäikeen pinnalla kuvan 5.4 mukaisesti. Furukawan mukaan johtimien pinnalla on niin sanottu emaloitu kalvo (engl. enameled film) [25]. Tyypillisesti emaloidulla kalvolla tarkoitetaan jonkin tyyppistä hartsia tai lakkaa emalin sijaan, toisin kuin nimen perusteella voisi luulla. Liitteessä B on esitetty TEX-ELZ johtimen mitat eri johtimen paksuuksille.

Kolmas yleisesti flyback-muuntajissa käytetty johdintyyppi on lakattu kuparilanka. Joissakin tapauksissa lakatusta kuparilangasta käytetään nimitystä emaloitu kuparilanka tai emalilanka (engl. enamelled wire). Nimensä mukaisesti lakatun kuparilangan pinnalla on tyypillisesti ohut kerros lakkaa tai hartsia, joka toimii eristeenä. Kuparilanka voidaan päällystää myös muilla ohuilla eristekerroksilla, mutta niitä ei tässä yhteydessä käsitellä, koska erikoistapauksien kirjo on hyvin laaja. Pelkästään päällystämisenä käytettäviä lakkoja ja hartseja on useita erilaisia, joista valitaan haluttujen ominaisuuksien perusteella sopivin. Tällainen ominaisuus voi olla esimerkiksi lämmönkesto. Lakatun kuparilangan eristekerroksen paksuus on jaettu luokkiin 1, 2 ja 3 (engl. grade 1, 2 ja 3), jotka määrittelevät kullekin kuparilangan halkaisijalle eristekerroksen paksuuden vaihteluvälin [26]. Ensimmäisen luokan lakatun kuparijohtimen eristekerroksen paksuus on pienin ja kolmannen luokan eristyspaksuus suurin. Liitteessä C on esitetty lakatun kuparijohtimen eristekerroksien paksuuksia eri luokilla.

5.2 Eristemateriaalit

Flyback-muuntajissa käytetään usein eristeenä erilaisia muoveista tehtyjä teippejä niiden yleisen saatavuuden ja edullisen hinnan vuoksi. Yleisimpiä eristeteippejä ovat polyeteeni-teippi eli PE-teippi sekä polyetyleenitereftalaatti-teippi eli PET-teippi. Muoveista tehdyillä teipeillä on myös hyvin suuri läpilyöntilujuus, esimerkiksi 3M:n valmistaman 0,063 mm paksun polyesteriteipin läpilyöntilujuus on 5500 V [27]. Taulukkoon 5.1 on listattu joidenkin eristemateriaalien suhteellisia permittiviteettejä.

Taulukko 5.1. Eristemateriaalien suhteellisia permittiviteettejä.

Eristemateriaalien suhteellisia permittiviteettejä	
Eristemateriaali	ϵ_r
Ilma	1,0006
Kumi	7
Lasi	5-10
Mylar	3,2
Nomex 410	1,6-3,7
Nomex 411	1,2-1,4
Polyamidi	4-4,5
Polyesteri	3,5
Polyeteeni (PE)	2,25
Polyetyleenitereftalaatti (PET)	3,4

Kuten edellisissä luvuissa on osoitettu, eristeiden suhteellisella permittiviteetillä voi olla suuri merkitys osittaispurkauksien syttymisjännitteeseen. Ilman pienen suhteellisen permittiviteetin vuoksi sähkökentän voimakkuus voi nousta eristysrakenteeseen jääneissä ilmataskuissa hyvin suureksi muuhun eristysrakenteeseen nähden, mikäli muiden eristeiden suhteelliset permittiviteetit ovat suuria. Tämän vuoksi PE- ja PET-teipin käyttäminen muuntajan eristeenä ei ole välttämättä paras ratkaisu osittaispurkauksien kannalta.

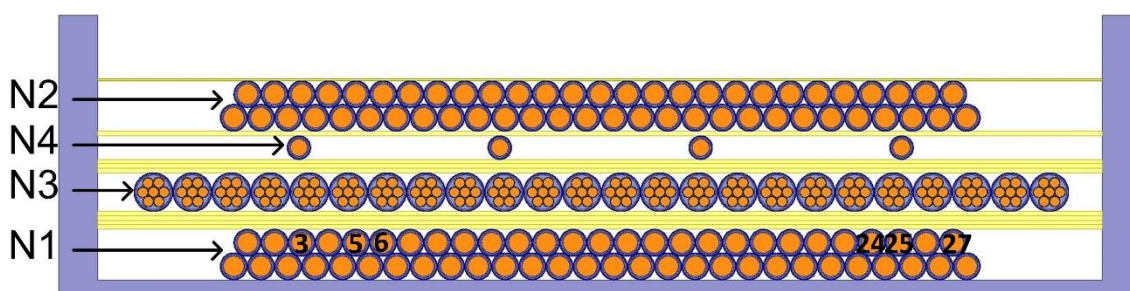
Taulukossa 5.1 Nomex 410 ja 411 ovat Dupontin valmistamia paperieristeitä, joilla on hyvin pieni permittiviteetti. Nomex 410 -paperin permittiviteetti kasvaa melko voimakkaasti, kun paperin paksuutta kasvatetaan. Jos Nomex 410 -paperin paksuus on 0,76 mm, paperin suhteellinen permittiviteetti on 3,7 [28]. Pienimmillään Nomex 410 -paperin suhteellinen permittiviteetti on 1,6, jolloin paperin paksuus on 0,05 mm [28]. Nomex-papereita käytetään paljon suuren lämpötilan vaativissa sovelluksissa niiden hyvän lämmönkeston ansiosta. Nomex 411 on Nomex 410 -paperin kalanteroimaton esiaste [29]. Kalanteroinnilla voidaan muokata paperin pinnan ominaisuuksia, kuten karheutta, kiiltävyyttä ja paksuutta. Nomex 411 -paperilla on pienempi permittiviteetti ja parempi impregnointikyky kuin Nomex 410 -paperilla [29]. Impregnointikyvyllä tarkoitetaan sitä, kuinka hyvin kyllästysaine kuten lakka imeytyy eristeeseen. Vastaavasti Nomex 410 -paperin läpilyöntilujuus on parempi kuin Nomex 411 -paperilla.

Taulukossa 5.1 mainittu Mylar on Dupontin valmistamaa polyesterikalvoa (engl. polyester film) [30]. Mylar-kalvon etuihin kuuluu sen hyvä läpilyöntikestoisuus verrattuna Nomex-papereihin. Kosteuden ja ympäristön epäpuhtauksien vuoksi flyback-muuntajat usein kastetaan lakkaan tai hartsataan, jotta epäpuhtaudet eivät pääse tunkeutumaan eristysrakenteeseen. Koska Mylar on muovikalvoa, se ei ime itseensä kosteutta toisin kuin Nomex-paperit, jolloin muuntajaa ei välttämättä tarvitse kastaa lakkaan tai hartsata. Kun lakka tai hartsi imeytyy Nomex-paperiin, paperin suhteellinen permittiviteetti kasvaa, koska lakkojen ja hartsien suhteellinen permittiviteetti on tyypillisesti suurempi (noin 3–8) kuin Nomex-paperilla. Lakatun tai hartsatun Nomex-paperin permittiviteetti on kuivan Nomex-paperin ja lakan tai hartsin suhteellisen permittiviteetin välissä. Eristysrakenteen impregnointia lakalla tai hartsilla käytetään myös ehkäisemään osittaispurkauksien syntyä. Impregnointia voidaan tehostaa suorittamalla lakkaus tai hartsaus tyhjiössä, jolla pyritään minimoimaan eristysrakenteeseen jäävät ilmataskut. Ilmataskuja on kuitenkin mahdoton poistaa kokonaan eristysrakenteesta. Eristysrakenteen impregnointi lakalla tai hartsilla saattaa jopa lisätä rakenteessa tapahtuvia osittaispurkauksia, jos ilmataskuja jää purkauksien syttymisen kannalta edullisiin paikkoihin.

6 MUUNTAJAN SÄHKÖKENTTÄLASKENTA

Tässä luvussa käsitellään käämintäjärjestykseltään kuvan 5.2 mukaisen flyback-muuntajan sähkökenttäsimulointien tuloksia. Simuloinneissa on käytetty Ansysin Maxwell 2014 ohjelmaa [31]. Maxwell-ohjelmisto käyttää sähkö- ja magneettikenttien laskennassa elementtimenetelmää (engl. finite element analysis, FEA). Elementtimenetelmässä tarkasteltava alue jaetaan pieniin osa-alueisiin, joita kutsutaan elementeiksi, joissa jokaisessa tarkasteltavaa kenttäsuuretta kuvaa oma polynominsa. Kenttäsuureiden laskennan jälkeen Maxwell-ohjelmisto arvioi, kullekin ratkaisutyypille ominaisella tarkastelumenetelmällä, virheen lasketussa energiassa ja vertaa tätä kokonaisenergiaan. Jos laskettu virhe on suurempi kuin simuloinnin alussa määritetty suurin sallittu virhe, ohjelma tihentää mallin elementtiverkkoa ja laskee uuden kierroksen niin kauan, että suurin sallittu virhearvo alitetaan. Elementtiverkko on tiheämpi terävien nurkkien ja pyöreiden pintojen läheisyydessä, joissa sähkökenttä on erityisen epähomogeeninen. [16; 32]

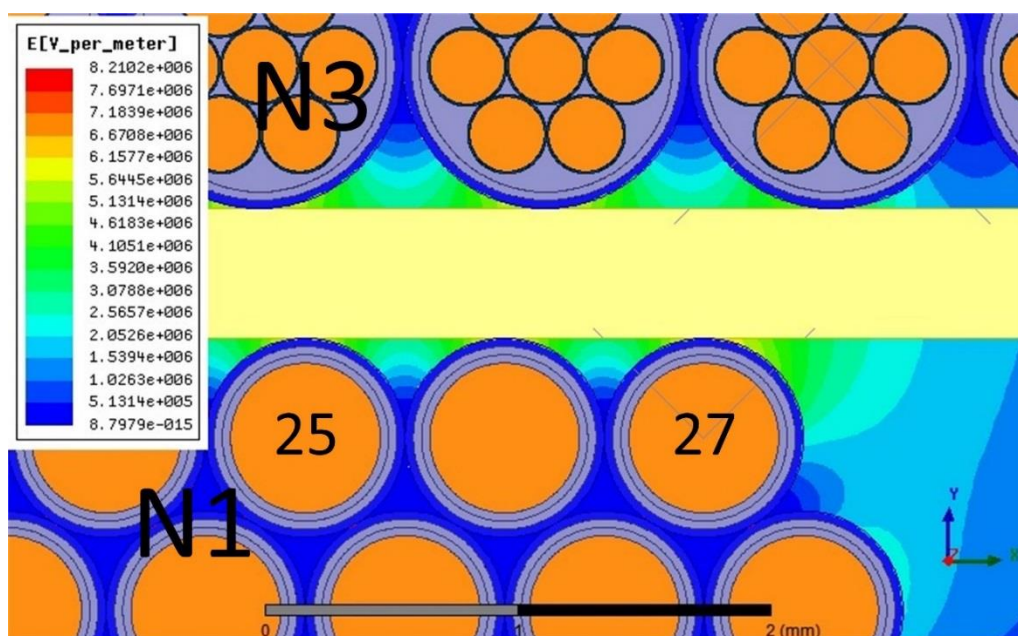
Maxwell-ohjelmistossa sähkökenttiä on mahdollista simuloida 3D-malleilla, mutta tässä työssä on yksinkertaisuuden vuoksi käytetty 2D-mallia ja sähköstaattisten kenttien ratkaisijaa. Sähköstaattisten kenttien ratkaisijassa käämien jännite pysyy koko simuloinnin ajan samana eli simuloinneissa vaihtojännitteen jaksosta otetaan vain yksi piste. Tämä piste on vaihtojännitejakson huippuarvo, jolla ensimmäinen osittaispurkaus todennäköisimmin syttyy. Kuvassa 6.1 on esitetty erään simuloitavan tapauksen simulointimalli.



Kuva 6.1. Flyback-muuntajan simulointimalli, kun käämeissä N1, N2 ja N3 on käytetty TEX-E johdinta ja käämissä N3 on käytetty TEX-ELZ johdinta.

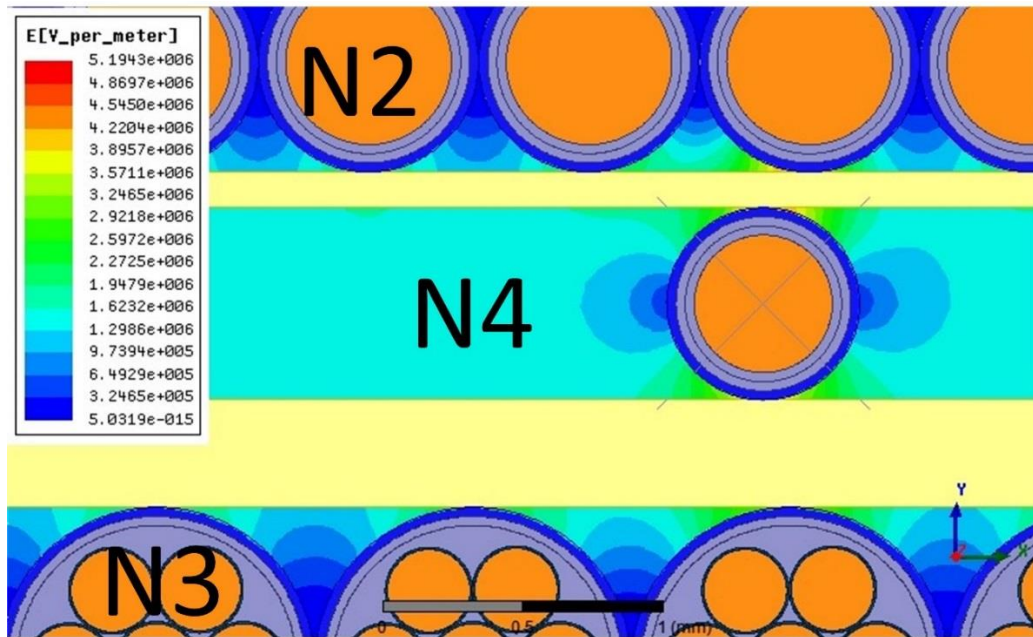
Kuvaan 6.1 on merkitty eri käämien käämikierrosten numerot, joita on käytetty myöhemmin kuvassa 6.5. Tulevissa tarkasteluissa jännitteen nimellisarvoksi on valittu käämivälin N1-N3 jännite $1.875U_{PD}$ luvussa 2.4 esitetyn standardin IEC 61800-5-1 mukaisesti. Kuvassa 6.2 on esitetty osa muuntajan sähkökentästä, kun käämissä N1 on jännitteen nimellisarvon eli 1 p.u. suuruinen jännite ja käämi N3 on maapotentiaalissa sekä käämit N2 ja N4 ovat kelluvassa potentiaalissa. Kelluvalla potentiaalilla tarkoitetaan sitä, että käämiä ei ole kytketty mihinkään potentiaaliin eli jännitelähteeseen tai

maapotentiaaliin. Simuloinneissa tarkastellaan sitä tilannetta, jolloin käämien välille kohdistuu suurin jänniterasitus, koska silloin ensimmäinen osittaispurkaus todennäköisimmin syttyy. Kuvissa 6.2–6.4 eristemateriaalina on käytetty Nomex 411 -paperia, joka on kuvissa keltaisella. Näissä simuloinneissa käämejä ei ole kastettu lakkaan tai hartsattu, koska niiden eristysrakenteeseen tunkeutumista on hankala arvioida. Käämien välissä on siis Nomex 411 -paperin lisäksi ainoastaan ilmaa. Kaikissa tämän luvun simuloinneissa on käytetty taulukon 5.1 mukaisia permittiviteettejä, ellei toisin ole mainittu. Kuvasta 6.2 nähdään, että suurin sähkökentän voimakkuus tulee käämin N1 reunimmaisen kierroksen (kuvassa numero 27) pinnalle, joka on lähempänä käämiä N3. Tämä johtuu siitä, että vierekkäiset käämikierrokset tasaavat toistensa pinnalla esiintyvää sähkökentän voimakkuutta samasta potentiaalista johtuen ja reunimmaisen käämikierroksen toisella puolella ei ole enää kierrosta, joka tasaisi sähkökenttää.



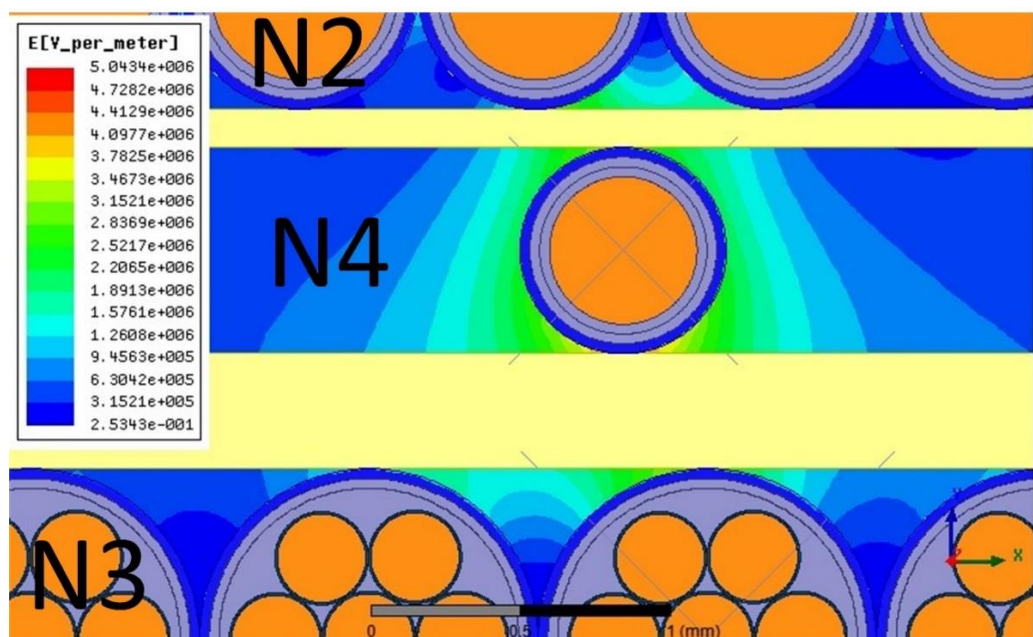
Kuva 6.2. Osa kuvan 6.1 mukaisen muuntajan simuloidusta sähkökentästä, kun käämissä N1 on 1 p.u. suuruinen jännite ja eristemateriaalina on Nomex 411 -paperia.

Kuvassa 6.3 on esitetty osa muuntajan sähkökentästä, kun käämissä N2 on 0,75 p.u. suuruinen jännite ja käämi N3 on maapotentiaalissa sekä käämit N1 ja N4 ovat kelluvassa potentiaalissa. Simuloinnissa käämissä N2 käytetty jännite 0,75 p.u. on laskettu yhtälön $1.875U_{PD}$ avulla. Käämien N2 ja N3 välillä esiintyy hakkurin toimiessa erisuuruinen toistuva huippujännite kuin käämien N1 ja N3 välillä, minkä vuoksi myös simuloinnissa käytetty jännite on erisuuruinen. Kuvan 6.3 tilanne eroaa hieman todellisesta tilanteesta, koska todellisuudessa käämien N2 ja N4 välissä oleva Nomex-paperi taipuu alempien eristekerrosten päälle, jolloin käämi N2 tulee lähemmäksi käämiä N3. Kuvasta 6.3 nähdään kuitenkin huomattava kentänvoimakkuuden kasvu käämin N4 johtimen läheisyydessä, joka johtuu johtimen pinnalle muodostuvasta tasapotentiaalipinnasta, kuten luvussa 3 on aiemmin esitetty.



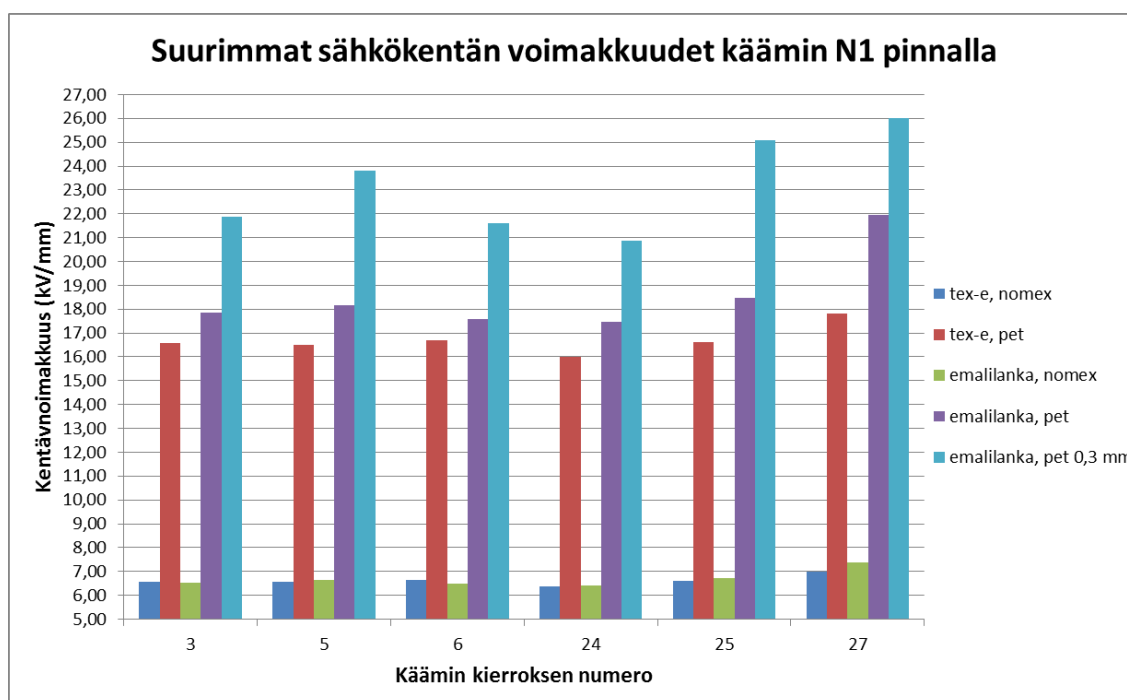
Kuva 6.3. Osa kuvan 6.1 mukaisen muuntajan simuloidusta sähkökentästä, kun käämissä N2 on 0,75 p.u. suuruinen jännite ja eristemateriaalina on Nomex 411 -paperia.

Kuvassa 6.4 on esitetty osa muuntajan sähkökentästä, kun käämissä N4 on 0,5 p.u. suuruinen jännite ja käämi N3 on maapotentiaalissa sekä käämit N1 ja N2 ovat kelluvassa potentiaalissa. Simuloinnissa käämissä N4 käytetty jännite 0,5 p.u. on laskettu kaavan $1.875U_{PD}$ avulla. Käämien N4 ja N3 välillä esiintyy hakkurin toimiessa erisuuruinen toistuva huippujännite kuin käämien N1 ja N3 tai käämien N2 ja N3 välillä, minkä vuoksi myös simuloinnissa käytetty jännite on erisuuruinen kuin edellä olevissa simuloinneissa.



Kuva 6.4. Osa kuvan 6.1 mukaisen muuntajan simuloidusta sähkökentästä, kun käämissä N4 on 0,5 p.u. suuruinen jännite ja eristemateriaalina on Nomex 411 -paperia.

Kuvasta 6.4 nähdään, että sähkökentän voimakkuus on huomattavan suuri myös käämin N2 suuntaan, vaikka se on kelluvassa potentiaalissa. Tämä johtuu käämin N2 käämikierrosten johtimien pinnalle muodostavasta tasapotentiaalipinnasta. Kuvassa 6.5 on esitetty simuloinneissa esiintyneet suurimmat sähkökentän voimakkuudet käämin N1 eri käämikierrosten pinnalla erilaisilla eristysrakennearratkaisuilla, kun käämissä N1 on 1 p.u. suuruinen jännite ja käämi N3 on maapotentiaalissa sekä käämit N2 ja N4 ovat kelluvassa potentiaalissa. Kierrosten numerot on esitetty kuvassa 6.1.



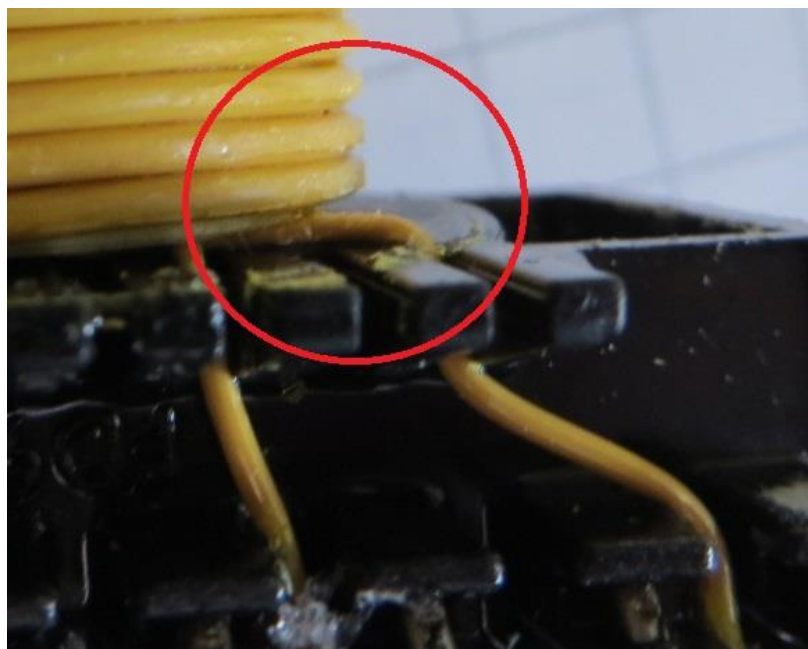
Kuva 6.5. Suurimmat simuloidut sähkökentän voimakkuudet käämin N1 käämikierrosten pinnalla.

Kuvan 6.5 tapauksissa käämi N3 on tehty kaikissa tapauksissa TEX-ELZ johtimesta ja käämi N1 on tehty joko TEX-E johtimesta tai luokan 2 lakatusta kuparijohtimesta (kuvassa emalilanka). Eristemateriaalina on käytetty joko polyetyleenitereftalaattia (PET) tai Nomex 411 -paperia. Yhdessä tapauksessa käämien N1 ja N3 välisen eristekerroksen paksuus on 0,3 mm ja lopuissa eristekerroksen paksuus on 0,52 mm. Kuvan 6.5 tulosten perusteella voidaan sanoa, että sähkökentän voimakkuudet johtimen pinnalla eivät juurikaan laske käyttämällä TEX-E johdinta lakatun kuparijohtimen sijaan. Pienemmän permittiviteetin ansiosta Nomex 411 -paperin käyttäminen eristeenä PET-teipin sijaan alentaa suurimpia sähkökentän voimakkuuksia merkittävästi, kuten lukujen 3 ja 4 perusteella voidaan olettaa. Kuvasta nähdään myös, että eristekerroksen ohentaminen suurentaa sähkökentän voimakkuuksia.

Kuten kuvista 6.2–6.4 nähdään, sähkökenttä muuntajan eristysrakenteessa on hyvin epähomogeeninen johtuen ympyränmuotoisista johtimista. Tästä johtuen osittaispurkauksien syttymisjännitettä ei voida suoraan arvioida kuvassa 4.4 esitetyn kuvaajan perusteella. Epähomogeenisessa sähkökentässä syttymisjännite on jonkin

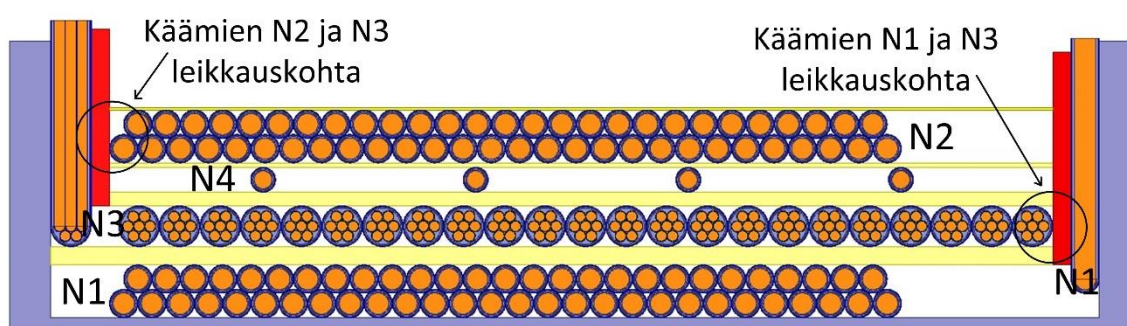
verran kuvassa 4.4 esitettyjä arvoja pienempi vastaaville etäisyyksille. Sähkökentän simuloinneilla voidaan siis ainoastaan vertailla eri eristysrakennetekniikoiden ominaisuuksia toisiinsa nähden, ja kunkin eristysrakenteen todellisen syttymisjännitteen selville saamiseksi muuntajille pitää tehdä osittaispurkausmittaus.

Kuvan 5.2 mukaiselle eristysrakenteelle on mahdollista, että käämien N1 ja N3 sekä N2 ja N3 välille voi jäädä kohtia, joissa käämien välille jää eristeeksi ainoastaan ilmaa. Tällainen kohta voi muodostua, kun käämien N1 tai N3 päät viedään kelarungon liitäntäterminaaleihin. Kuvassa 6.6 on esitetty esimerkki tällaisesta leikkauskohtasta.



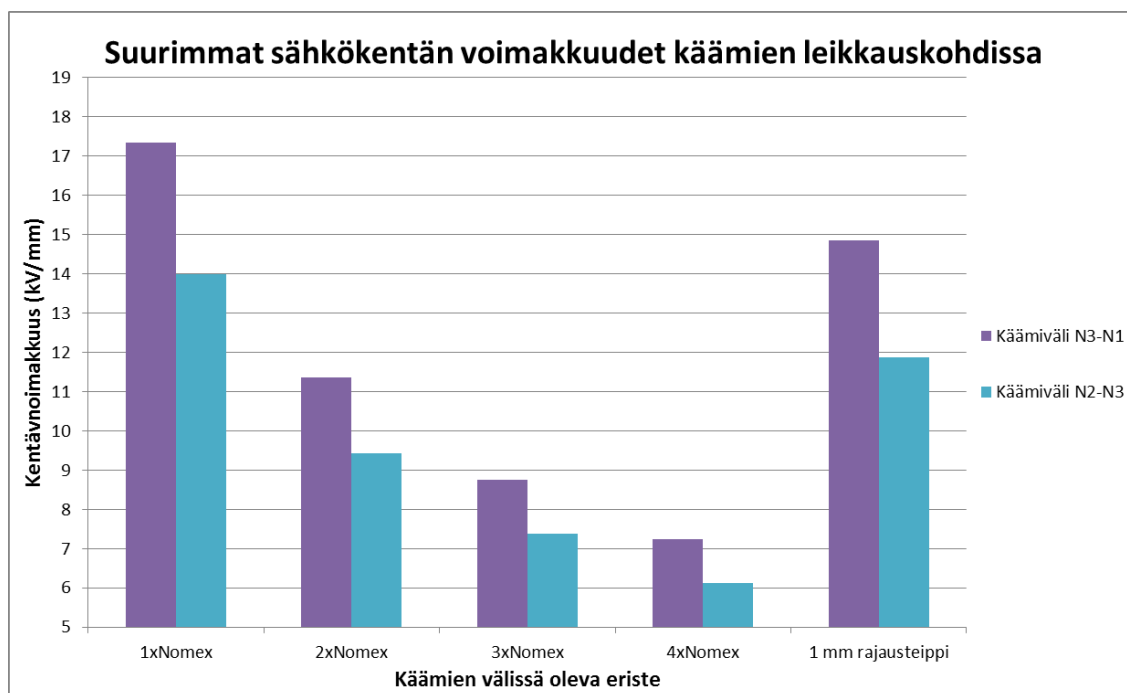
Kuva 6.6. Käämien leikkauskohta.

Kuvan 6.6 mukaisten leikkauskohtien takia muuntajalle simuloitiin erilaisia lisäeristeratkaisuja kuvan 6.7 mukaisella simulointimallilla. Kuvassa 6.7 punaisella olevat eristeet ovat lisäeristeitä, joiden materiaaleja ja paksuuksia muutettiin simulointitapauksesta riippuen.



Kuva 6.7. Simulointimalli lisäeristeratkaisuja varten.

Kuvassa 6.8 on esitetty simuloinneissa esiintyneet suurimmat sähkökentän voimakkuudet käämien N1 ja N3 sekä N2 ja N3 leikkauskohdissa, kun käämien väliin on laitettu erilaisia eristeitä leikkauskohdassa. Kuvan 6.8 suurimpien kentänvoimakkuuksien laskennassa käytetyt alueet ovat ympyröity kuvassa 6.7. Kuvan 6.8 simuloinneissa käämien N1 ja N3 välillä on ollut 1 p.u. suuruinen jännite ja käämien N2 ja N3 välillä on ollut 0,75 p.u. suuruinen jännite, kuten aiemmissa simulointitapauksissa kyseisten käämien välillä.



Kuva 6.8. Suurimmat simuloidut sähkökentän voimakkuudet käämien leikkauskohdissa johtimen pinnalta laskettuna.

Kuvassa 6.8 ”1xNomex” tarkoittaa, että käämien välissä on leikkauskohdassa yksi Nomex 411 -paperisuikale, jonka paksuus on 0,13 mm. Vastaavasti ”2xNomex”, ”3xNomex” ja ”4xNomex” kohdissa käämien välissä on kaksi, kolme ja neljä 0,13mm paksuista Nomex 411 -paperisuikaleita. 1 mm levyinen rajausteippi teipataan käämi-ikkunan päähän ennen käämin N3 käämimistä siten, että käämi N3 ei voi kuvan 6.6 mukaisessa tapauksessa tulla alle 1 mm päähän käämistä N1. Vastaavasti rajausteippi teipataan käämi-ikkunan päähän ennen käämin N2 käämimistä, jolloin käämi N2 ei voi tulla alle 1 mm päähän käämistä N3 käämien leikkauskohdassa. Simuloinneissa rajausteipin suhteellisena permittiviteettinä on ollut 3,5.

Kuvasta 6.8 nähdään, että jo kahdella Nomex 411 -paperisuikaleella käämien leikkauskohdassa esiintyy pienempiä sähkökentän voimakkuuksia kuin rajausteipillä. Rajausteippi on kuitenkin huomattavasti käytännöllisempää muuntajien rakentamisen kannalta kuin Nomex-paperisuikaleiden käyttö. Kuvan 6.5 ja 6.8 arvoista nähdään, että suurin sähkökentän voimakkuus on samaa luokkaa käämien leikkauskohdassa kuin muualla eristysrakenteessa, kun leikkauskohdassa käytetään neljää Nomex-suikaletta ja muualla eristysrakenteessa on käytetty Nomex-eristettä. Vastaavasti suurin sähkökentän

voimakkuus on samaa luokkaa käämien leikkauskohdassa kuin muualla eristysrakenteessa, jos leikkauskohdassa on käytetty eristeenä rajausteippiä ja muualla eristysrakenteessa on käytetty eristeenä PET-teippiä.

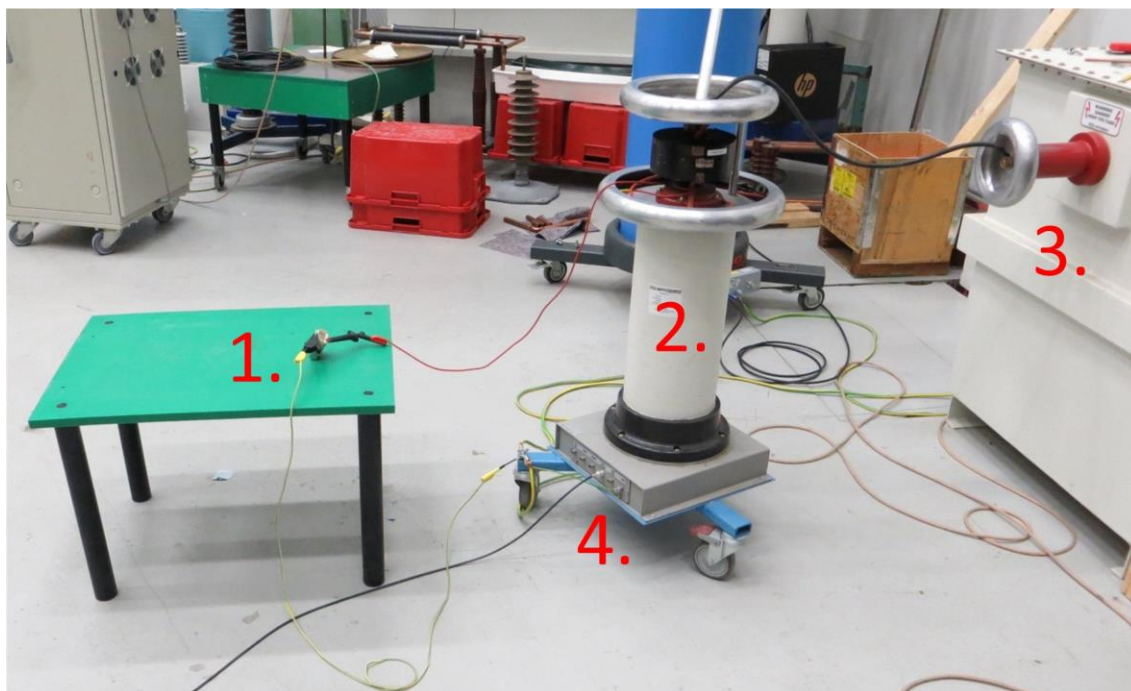
7 OSITTAISPURKAUSMITTAUKSET LABORATORIOSSA

Tässä luvussa käsitellään käämintäjäjärjestykseltään kuvan 5.2 mukaisen flyback-muuntajan osittaispurkausmittausten tuloksia. Testattavien muuntajien eristysrakenteet valittiin luvun 6 simulointien perusteella. Tässä luvussa esitetään mitatut osittaispurkauksien sammumisjännitteet erilaisille eristysrakennerratkaisuille. Luvussa ei käsitellä osittaispurkausten tasoa niiden syttymisen jälkeen, koska luvussa 2.4 käsitellyn standardin IEC 61800-5-1 mukaan eristysrakenteen tulee olla osittaispurkausvapaa jännitteellä $1,5U_{PD}$. Luvussa ei myöskään esitellä osittaispurkauksien syttymisjännitteitä erilaisille eristysrakennerratkaisuille, koska työn kannalta sammumisjännitteet ovat olennaisempia ja sammumisjännitteistä on nähtävissä samat ilmiöt eristysrakennerratkaisujen välillä kuin syttymisjännitteistä. Standardin IEC 61800-5-1 mukaan muuntajat pitää esikäsitellä ennen osittaispurkaustestiä standardin IEC 60664-1 luvussa 4.1.2.1 esitetyllä käsittelytavalla b. [1]

Käsittelytavassa b muuntajat pidetään vaihtelevassa lämpötilassa 72 tunnin ajan. Tänä aikana lämpötila vaihtelee $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ ja $55\text{ }^{\circ}\text{C}$ välillä 24 tunnin syklillä. Käsittelyn tarkoituksena on kiihdyttää ilmakuplien muodostumista muuntajan eristysrakenteeseen, jotka voisivat syntyä sinne varastoinnin, kuljetuksen tai normaalin käytön aikana. Mahdollisesti muodostuvat ilmakuplat lisäävät osittaispurkauksien mahdollisuutta muuntajissa. [33, s. 72]

Standardissa IEC 61800-5-1 suositellaan, että osittaispurkaustesti suoritetaan vasta luvussa 2.4 käsitellyn syöksyjännitetestin jälkeen, jotta mahdolliset syöksyjännitetestissä syntyvät eristysrakenteen vauriot ilmenevät osittaispurkaustestissä. Tämän vuoksi kaikille muuntajille tehtiin myös syöksyjännitetestti ennen osittaispurkaustestiä. Kaikki testatut muuntajat läpäisivät syöksyjännitetestin. Standardin IEC 61800-5-1 mukaisesti syöksyjännitetestissä samaan piiriin kuuluvat käämit oikosuljettiin ja kytkettiin yhteen. Työssä käsiteltävän muuntajan tapauksessa ensiökäämit ja apukäämi kuuluvat samaan piiriin, joten ne oikosuljettiin ja kytkettiin yhteen. Tämän lisäksi myös toisiokäämi oikosuljettiin.

Muuntajien esivalmisteluiden jälkeen muuntajille tehtiin osittaispurkaustesti Tampereen teknillisen yliopiston suurjännitelaboratoriossa. Kuvassa 7.1 on esitetty osittaispurkaustestissä käytetty mittauskytkentä.



Kuva 7.1. Osittaispurkaustestin mittauskytkentä.

Kuvassa 7.1 numero 1. on koekappale eli tässä tapauksessa flyback-muuntaja. Numero 2. on kytkentäkondensaattori, numero 3. on syöttömuuntaja ja numero 4. on mittausanturi. Kuvassa osittaispurkauksen mittaus tapahtuu siis kytkentäkondensaattorin haarasta. Osittaispurkauksen mittauskytkentää ja sen komponentteja on käsitelty tarkemmin luvussa 4.4. Mittauskytkentä vastaa standardissa IEC 60664-1 kohdassa C.1 esitettyä mittauskytkentää, jolla standardin IEC 61800-5-1 mukainen osittaispurkaustesti tulee suorittaa. Mittauskytkennässä on mahdollista esiintyä suurilla jännitteillä luvussa 4.1.3 esitellyjä koronapurkauksia, koska mitattujen muuntajien liitäntäterminaalit sisältävät teräviä kulmia. Jos koronapurkaukset syttyisivät liitäntäterminaalissa ennen eristysrakenteen sisällä tapahtuvia osittaispurkauksia, mittauksessa tulisi virheellinen syttymisjännite eristysrakenteessa tapahtuville purkauksille. Koronapurkaukset ovat kuitenkin helppo erottaa sisäisistä- ja pintapurkauksista, eikä niitä havaittu minkään muuntajan mittauksen yhteydessä.

Jotta jokaiselle muuntajalle saatiin mitattua käämikohtaiset osittaispurkauksien syttymis- ja sammumisjännitteet, standardin IEC 61800-5-1 mukaista osittaispurkaustestiä sovellettiin siten, että jokainen ensiöpiiriin kuuluva käämi testattiin erikseen toisiokäämiin nähden. Standardin IEC 61800-5-1 mukaisessa testissä kaikki ensiöpiiriin kuuluvat käämit on kytketty yhteen ja ne testataan samalla kertaa toisiokäämiin nähden. Osittaispurkaustesti suoritettiin siis kuvan 5.2 merkintöjä käyttäen käämiväleille N1-N3, N2-N3 ja N4-N3. Testissä ei myöskään käytetty kuvan 2.15 mukaista jännitettä, vaan testissä jännitettä nostettiin niin kauan, että osittaispurkaukset syttyivät ja tämän jälkeen jännitettä laskettiin niin kauan, että osittaispurkaukset sammui. Standardin mukaisen jännitteen käyttö antaa vain tiedon läpäisikö muuntaja osittaispurkaustestin vai ei. Poikkeamalla edellä esitetyllä tavalla standardin mukaisesta

jännitteestä saadaan tarkat arvot muuntajan osittaispurkauksien syttymis- ja sammumisjännitteille, jolloin muuntajien eri eristysrakenneratkaisujen vertailu tulee helpommaksi. Jos osittaispurkaustestissä olisi käytetty vain standardin mukaista jännitettä ja kaikki muuntajat läpäisisivät testin, ei voitaisi sanoa, mikä eristysrakenneratkaisu on paras ja millaisella marginaalilla testi läpäistiin.

Ennen osittaispurkaustestien suorittamista osittaispurkausmittausjärjestelmä kalibroitiin, jotta mittalaite näyttää osittaispurkauksien suuruuden oikein. Kalibrointi tehtiin Tettex:n 9216 osittaispurkauskalibraattorilla, joka kytkettiin koekappaleen rinnalle luvussa 4.2.1 esitetyllä tavalla. Käämivälien N1-N3 ja N2-N3 mittausten välissä kalibrointia ei suoritettu uudestaan, koska käämivälien kapasitanssit ovat suunnilleen saman suuruiset, jolloin mittalaitteen näyttämässä osittaispurkauksen suuruudessa ei esiinny merkittävää virhettä. Kuten on aiemmin todettu, standardin IEC 61800-5-1 mukaan eristysvälin tulee olla osittaispurkausvapaa käytetyllä testijännitteellä, joten osittaispurkauksien tason tarkka tunteminen niiden syttymisen jälkeen ei ole tarpeellista. Käämivälin N4-N3 osittaispurkausmittaukseen mittausrakenteen kalibrointi suoritettiin uudestaan, koska käämivälin N4-N3 kapasitanssi poikkeaa käämivälien N1-N3 ja N2-N3 kapasitanssista. Luvussa 7.1 on esitelty mitattujen muuntajien eristysrakenteet.

7.1 Mitattujen muuntajien eristysrakenteet

Lukujen 7.2–7.5 kuvissa ja taulukoissa eristysrakenne ”Nomex” tarkoittaa, että muuntajassa on käytetty eristeenä luvussa 5.2 esiteltyä Nomex 411 -paperia. Eristysrakenne ”Nomex, rajausteippi” tarkoittaa, että muuntajassa on käytetty eristeenä Nomex 411 -paperia ja tämän lisäksi käämi-ikkunan reunoille on laitettu 1 mm levyistä rajausteippiä. Rajausteipin tarkoituksena on estää käämien osuminen toisiinsa kuvan 6.6 mukaisessa leikkauskohdassa. Rajausteippiä on käytetty käämien N2 ja N3 eristekerroksien päissä, koska näiden käämien ja sekä käämien N1 ja N3 välillä voi esiintyä kuvan 6.6 mukaisia leikkauskohtia. Eristysrakenne ”Nomex, suikale” tarkoittaa, että muuntajassa on käytetty eristeenä Nomex 411 -paperia ja tämän lisäksi käämi-ikkunan reunaan on laitettu Nomex 411 -paperisuikaleita, joiden tarkoituksena on estää käämien osuminen toisiinsa niiden leikkauskohdassa. Käämin N3 reunaan on laitettu neljä Nomex 411 -paperisuikaleita. Lukujen 7.2–7.5 kuvissa ja taulukoissa eristysrakenne ”Mylar, rajausteippi” tarkoittaa, että muuntajassa on käytetty eristeenä luvussa 5.2 esiteltyä Mylar-kalvoa ja tämän lisäksi käämi-ikkunan reunoille on laitettu 1 mm levyistä rajausteippiä, joiden tarkoitus on sama kuin edellä eli estää käämejä osumasta toisiinsa niiden leikkauskohdassa.

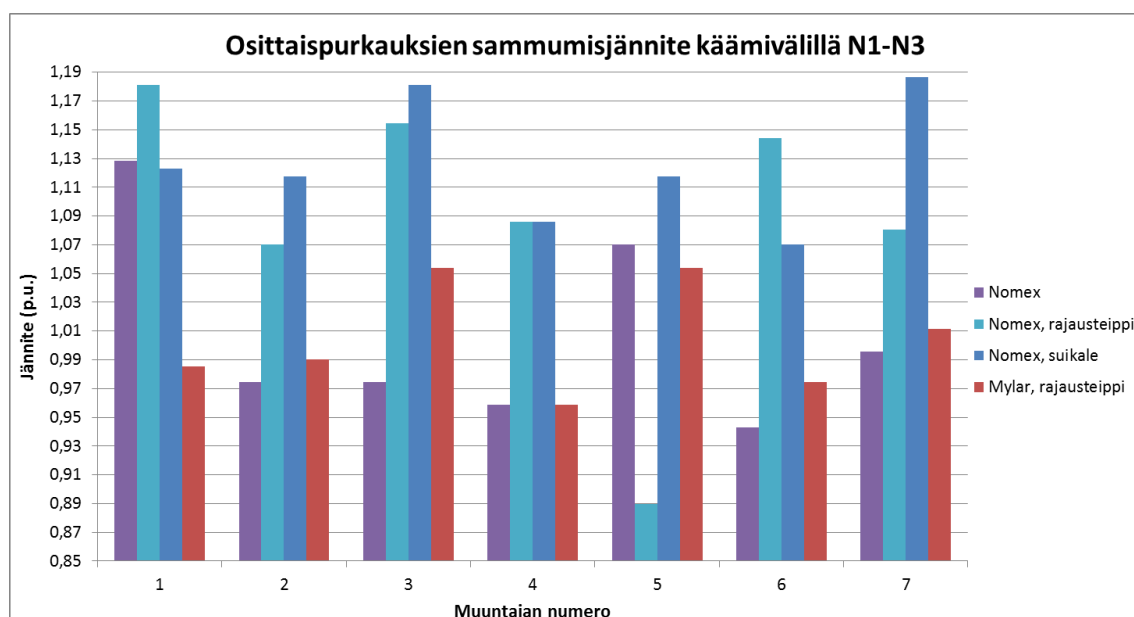
Kaikissa eristysrakenneratkaisuissa muuntajat kastettiin lopuksi lakkaan. Lakkaamattomia muuntajia ei testattu muuntajan ympäristössä mahdollisesti olevan kosteuden ja epäpuhtauksien vuoksi, kuten luvussa 5.2 on esitetty. Lakalla on tarkoitus estää ja vähentää ilmataskujen jäämistä eristysrakenteeseen sekä estää kosteuden ja epäpuhtauksien tunkeutuminen eristysrakenteeseen.

Muuntajissa käytettiin saman paksuista Nomex 411 -paperia ja Mylar-kalvoja, jotta eristekerroksien paksuuden vaihtelu ei vaikuttaisi saatuihin tuloksiin. Käämien N1 ja N3 välillä on kaikissa mitatuissa muuntajissa neljä eristekerrosta. Käämien N3 ja N4 välillä on kaikissa mitatuissa muuntajissa kolme eristekerrosta. Käämien N4 ja N2 välillä on kaikissa mitatuissa muuntajissa yksi eristekerros. Kaikissa mitatuissa muuntajissa on käytetty käämeissä N1, N2 ja N4 luvussa 5.1 esiteltyä TEX-E johdinta. Käämeissä N1 ja N2 on käytetty TEX-E johdinta, jonka kuparijohtimen halkaisija on 0,6 mm. Käämissä N4 on käytetty TEX-E johdinta, jonka kuparijohtimen halkaisija on 0,5 mm. Käämissä N3 on käytetty luvussa 5.1 esiteltyä TEX-ELZ johdinta, jossa yhden kuparisäikeen halkaisija on 0,3 mm. Muuntajissa käytettiin johtimina TEX-E ja TEX-ELZ johtimia lakatun kuparijohtimen sijaan, koska niiden havaittiin aiheuttavan hieman pienemmät sähkökentänvoimakkuudet eristysrakenteeseen luvun 6 simuloinneissa.

Kaikista neljästä eristysrakennerratkaisuista mitattiin 7 eri muuntajaa eli yhteensä 28 muuntajaa, jotta saatiin käsitys tuloksien hajonnasta. Lukujen 7.2–7.5 kuvissa ja taulukoissa jännitteen nimellisarvona eli 1 p.u. on käytetty samaa arvoa kuin luvun 6 simuloinneissa. Luvuissa 7.2–7.4 on esitetty mitatut osittaispurkauksien sammumisjännitteet eri käämiväleille. Luvussa 7.5 on esitetty mitattujen osittaispurkauksien sammumisjännitteiden keskiarvot kaikille mitatuille käämiväleille sekä eristysrakennerratkaisuille.

7.2 Osittaispurkauksien sammumisjännite käämivälillä N1-N3

Kuvassa 7.2 on esitetty mitatut osittaispurkauksien sammumisjännitteet eri eristysrakenteille käämivälillä N1-N3 kuvan 5.2 merkintöjen mukaisesti.



Kuva 7.2. Osittaispurkauksien mitatut sammumisjännitteet (vaihtojännitteen huippuarvo) käämivälillä N1-N3.

Kuten kuvasta 7.2 nähdään, sammumisjännitteillä on melko suuri hajonta eri muuntajien välillä samalla eristysrakenteella. Kaikki muuntajat ovat käämitty käsin, joten käämikierrosten asettuminen käämi-ikkunaan vaihtelee muuntajien välillä, vaikka kaikissa mitatuissa muuntajissa käämikierrosten lukumäärät ja käytetyt johtimet ovat samat. Pienikin vaihtelu johtimien paikassa voi aiheuttaa eroa mittaustuloksissa muuntajien välillä. Tämän lisäksi lakan tunkeutuminen muuntajan eristysrakenteeseen vaihtelee muuntajien välillä muun muassa käämikierrosten asettumisesta käämi-ikkunaan johtuen, jolloin muuntajien eristysrakenteeseen jää erisuuruisia ilmakuplia eri paikkoihin.

Kuvan 7.2 tuloksista on kuitenkin nähtävissä trendejä eri eristysrakenneratkaisujen sammumisjännitteiden välillä. Muuntajilla, joissa on käytetty Nomex-paperia sekä rajausteippiä tai Nomex-suikaleita, on keskimäärin suurempi sammumisjännite kuin muilla eristysrakenneratkaisuilla. Tämä tukee hyvin aiemmin esitettyä ja simuloitua hypoteesia, että osittaispurkaukset syttyisivät ensimmäisenä kuvassa 6.6 esitetyssä käämien leikkauskohdassa. Muuntajassa numero viisi, jossa on käytetty Nomex-paperia ja rajausteippiä, mitattiin huomattavasti pienempi sammumisjännite kuin muilla kyseisen eristysrakenneratkaisun muuntajilla. Kyseisen muuntajan purkamisen yhteydessä selvisi, että rajausteippi ei ollut suunnitellussa kohdassa ja sen seurauksena käämien N1 ja N3 väliin jäi kuvan 6.6 mukaisessa leikkauskohdassa kyseissä muuntajassa vain ilmaa. Tämä tukee hyvin käsitystä, että osittaispurkaukset syttyisivät ensimmäisenä kyseisessä leikkauskohdassa.

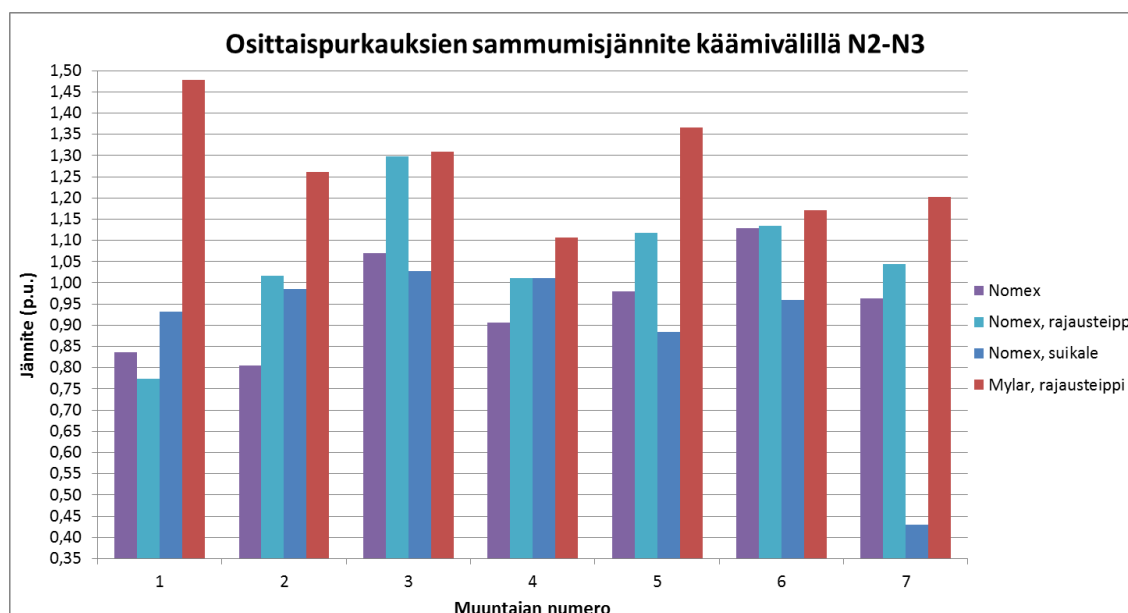
Kuvan 7.2 tuloksista nähdään, että muuntajilla, joissa on käytetty Mylar-kalvoja, on keskimäärin lähes saman suuruinen sammumisjännite kuin muuntajilla, joissa on käytetty pelkkää Nomex-paperia. Mylar-kalvolla on suurempi permittiviteetti kuin Nomex-paperilla, ja kuten luvun 6 simuloinneissa on esitetty suuremman permittiviteetin omaava eriste aiheuttaa suurempia sähkökentänvoimakkuuksia eristysrakenteen ilmakuplissa. Mitatut muuntajat ovat kuitenkin kastettu lakkaan, jonka permittiviteetti on suurempi kuin Nomex 411 -paperin, jolloin Nomex-paperin permittiviteetti kasvaa lakan imeytyessä siihen. Tämä voi selittää, miksi Mylar-kalvolla tehtyjen muuntajien sammumisjännitteet ovat suunnilleen samalla tasolla muuntajien kanssa, joissa on käytetty pelkkää Nomex-paperia. Toisaalta Mylar-kalvo ei ime lakkaa itseensä, joten sen permittiviteetti ei muutu lakan vaikutuksesta. Lakka tunkeutuu kuitenkin Mylar-kalvon ja johtimien väliin jääviin rakoihin, jolloin mahdollisissa jäljelle jäävissä ilmakuplissa esiintyy entistä isompia sähkökentänvoimakkuuksia, kuten tapahtuu myös Nomex-paperin yhteydessä.

Mylar-kalvolla tehtyjen muuntajien purkamisessa nähtiin, että lakka ei juurikaan ollut tunkeutunut käämin N1 ja eristeenä käytetyn Mylar-kalvon väliin, jolloin osittaispurkauksille otollisia ilmakuplia jäi eristysrakenteeseen huomattavasti. Myöskin kaikissa muuntajissa, joissa oli käytetty eristeenä Nomex-paperia, havaittiin, että Nomex-paperi ei ole täysin kastunut lakkaan keskeltä paperia. Siten myös Nomex-paperilla tehdyissä muuntajissa on eristysrakenteessa huomattavasti osittaispurkauksille sopivia ilmakuplia.

Lakan imeytyminen Nomex-paperiin saattoi heiketä entisestään, kun käämikkunan reunaan lisättiin rajausteippi tai Nomex-suikaleita ja siten eristysrakenteeseen saattoi jäädä isompia ilmakuplia. Tämä voi osaltaan selittää, miksi muuntajilla, joissa on käytetty Nomex-paperia sekä rajausteippiä tai Nomex-suikaleita, ei ollut huomattavasti suurempia sammumisjännitteitä kuin muuntajilla, joissa oli käytetty pelkkää Nomex-paperia eristeenä. Toisaalta yhdessäkään puretussa muuntajassa, jossa oli käytetty pelkkää Nomex-paperia eristeenä, käämit N1 ja N3 eivät olleet kosketuksesta käämien leikkauskohdassa, mikä voi selittää miksi yhdessäkään pelkällä Nomex-paperilla tehdyssä muuntajassa ei esiintynyt erittäin pientä sammumisjännitettä.

7.3 Osittaispurkauksien sammumisjännite käämivälillä N2-N3

Kuvassa 7.3 on esitetty mitatut osittaispurkauksien sammumisjännitteet eri eristysrakenteille käämivälillä N2-N3 kuvan 5.2 merkintöjen mukaisesti.



Kuva 7.3. Osittaispurkauksien mitatut sammumisjännitteet (vaihtojännitteen huippuarvo) käämivälillä N2-N3.

Kuvan 7.3 tuloksista nähdään, että keskimäärin suurin sammumisjännite käämivälillä N2-N3 esiintyi muuntajilla, joiden eristysrakenteessa on käytetty Mylar-kalvoa ja rajausteippiä, toisin kuin käämivälillä N1-N3. Puretuissa Mylar-kalvolla tehdyissä muuntajissa lakka oli tunkeutunut hyvin sekä käämin N2 ja Mylar-kalvon että käämin N3 ja Mylar-kalvon väliin, mikä voi selittää suuremmat sammumisjännitteet suhteessa muihin eristysrakennetekniikoihin, vaikka käämivälillä N1-N3 näin ei ollut. Puretuissa muuntajissa, joissa oli käytetty Nomex-paperia eristeenä, Nomex-paperi oli osittain kuiva keskeltä, kuten käämivälillä N1-N3.

Lisäksi Mylar-kalvo ei juurikaan taivu verrattuna Nomex-paperiin, joten Mylar-kalvo ei juurikaan myötäile kuvassa 5.2 esitetyn harvasti käämityn apukäämin N4 muotoja, vaan eristysrakenne jää kuvan 5.2 kaltaiseksi, jolloin käämin N2 ja N3 välille jää suurempi etäisyys. Toisaalta lakka ei ollut tunkeutunut harvaan käämityn apukäämin käämikierrosten väliin, joten käämien N2 ja N3 välillä on runsaasti ilmaa käämin N4 kerroksessa. Muuntajassa numero yksi, jossa on käytetty Mylar-kalvoa eristeenä, käämien N4 ja N3 väliin oli laitettu virheellisesti yksi eristekerros enemmän kuin muihin muuntajiin, mikä näkyy sammumisjännitteen kasvamisena myös käämivälillä N2-N3. Sammumisjännitteen kasvaminen eristyspaksuuden lisääntymisen yhteydessä varmistaa myös sen, että osittaispurkauksia esiintyi ensimmäisenä eristysrakenteen onteloissa, eikä käämien N2 ja N3 leikkauskohdassa.

Muuntajassa numero yksi, jossa on käytetty Nomex-paperia ja rajausteippiä eristeenä, rajausteippi ei ollut suunnitellussa kohdassa käämin N2 kerroksessa ja tämän seurauksena käämit N1 ja N3 pääsivät lähelle toisiaan niiden leikkauskohdassa. Kyseisellä muuntajalla oli myös pienempi sammumisjännite käämivälillä N1-N3 kuin muilla vastaavan eristysrakenteen muuntajilla, mikä tukee hyvin aiemmin esitettyä teoriaa, että purkaukset syttyisivät ensin käämien leikkauskohdassa. Muuntajien, joissa on käytetty Nomex-paperia ja rajausteippiä, sammumisjännitteet eivät olleet merkittävästi suurempia kuin muuntajilla, joissa oli käytetty eristeenä pelkkää Nomex-paperia. Tämä voi johtua samoista asioista kuin käämivälillä N1-N3 eli lakan heikentyneestä tunkeutumisesta eristysrakenteeseen ja siitä, että muuntajissa, joissa on käytetty pelkkää Nomex-paperia eristeenä, käämit N2 ja N3 eivät kosketa toisiaan leikkauskohdassa. Muuntajassa numero 4, jossa on käytetty eristeenä pelkkää Nomex-paperia, käämi N2 oli melko lähellä käämiä N3 käämien leikkauskohdassa. Kyseisellä muuntajalla ei kuitenkaan ole erityisen pieni syttymisjännite, mikä voi selittyä sillä, että käämien leikkauskohtaan oli tunkeutunut lakkaa, jolloin käämien välissä ei ole pelkästään ilmaa.

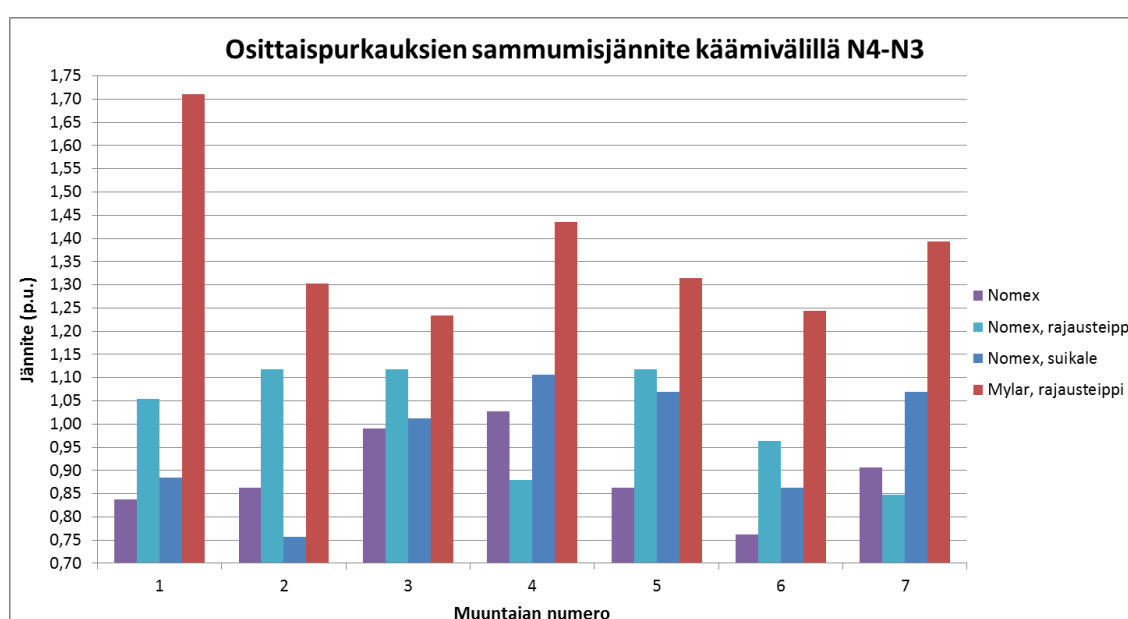
Muuntajilla, joissa on käytetty Nomex-paperia ja Nomex-suikaleita eristysrakenteessa, on käämivälillä N2-N3 keskimäärin suunnilleen saman suuruinen sammumisjännite kuin muuntajilla, joissa on käytetty eristeenä pelkkää Nomex-paperia. Kyseisellä käämivälillä kaikki Nomex-suikaleet olivat kaikissa kyseisen eristysrakennetarkistuksen muuntajissa asetettu suunnitellusta poikkeavalla tavalla käämien väliin niiden leikkauskohdassa, jolloin leikkauskohdassa käämien välillä oli ainoastaan ilmaa eristeenä. Tämä selittää miksi muuntajat, joissa on käytetty Nomex-paperia ja Nomex-suikaleita eristysrakenteessa, sekä muuntajat, joissa on käytetty eristeenä pelkkää Nomex-paperia, saivat suunnilleen saman suuruisia sammumisjännitteitä.

Poikkeuksena on kuitenkin muuntajan numero seitsemän, jossa on käytetty Nomex-paperia ja Nomex-suikaleita, sammumisjännite. Kyseisen muuntajan sammumisjännite on huomattavasti pienempi kuin millään muulla mitatulla muuntajalla käämivälillä N2-N3. Muuntajan purkamisen yhteydessä ei löytynyt paljaalla silmällä nähtävää syytä, mikä olisi aiheuttanut näin suuren muutoksen muuntajan sammumisjännitteessä. Kyseissä muuntajassa lakka vaikutti olevan tunkeutunut hieman

paremmin kyseisessä käämivälissä eristeenä käytettyyn Nomex-paperiin kuin muissa vastaavan eristysrakenteen muuntajissa. Lisäksi kyseisellä muuntajalla osittaispurkauksien taso oli hyvin pieni niiden syttymisen jälkeen, mikä yleensä tarkoittaa hyvin pientä onteloa eristysrakenteessa, jossa osittaispurkaus tapahtuu. Muuntajan eristysrakenteeseen on siis todennäköisesti jäänyt osittaispurkauksien syttymisen kannalta erittäin otolliseen kohtaan pieni ilmakupla, joka aiheuttaa pienen osittaispurkauksien sammumisjännitteen.

7.4 Osittaispurkauksien sammumisjännite käämivälillä N4-N3

Kuvassa 7.4 on esitetty mitatut osittaispurkauksien sammumisjännitteet eri eristysrakenteille käämivälillä N4-N3 kuvan 5.2 merkintöjen mukaisesti.



Kuva 7.4. Osittaispurkauksien mitatut sammumisjännitteet (vaihtojännitteen huippuarvo) käämivälillä N4-N3.

Kuvan 7.4 tuloksista nähdään, että keskimäärin suurin sammumisjännite käämivälillä N4-N3 esiintyi muuntajilla, joiden eristysrakenteessa on käytetty Mylar-kalvoa ja rajausteippiä. Puretuissa Mylar-kalvolla tehdyissä muuntajissa lakka oli tunkeutunut hyvin sekä käämin N4 ja Mylar-kalvon että käämin N3 ja Mylar-kalvon väliin, mikä voi selittää paremmat sammumisjännitteet suhteessa muihin eristysrakennearatkaisuihin. Lisäksi tuloksissa näkyy selvästi muuntajan numero yksi, jossa on käytetty Mylar-kalvoa eristeenä, muita kyseisen eristysrakennearkaisun muuntajia suurempi sammumisjännite, joka johtuu käämien N4 ja N3 väliin virheellisesti laitetusta yhdestä ylimääräisestä eristekerroksesta.

Käämivälillä N4-N3 kaikilla muuntajilla, joissa on käytetty Nomex-paperia eristeenä, pitäisi olla suunnilleen sama sammumisjännite, koska käämi N4 on kaikissa tapauksissa keskellä käämi-ikkunaa, joten rajausteippi tai Nomex-suikaleet eivät suoraan

vaikuta käämivälin sammumisjännitteisiin. Muuntajilla, joissa on käytetty Nomex-paperia sekä rajausteippiä tai Nomex-suikaleita, on kuitenkin keskimäärin hieman suurempi sammumisjännite kuin muuntajilla, joissa on käytetty pelkkää Nomex-paperia. Kaikissa muuntajissa, joissa on käytetty rajausteippejä tai Nomex-suikaleita, käämi N3 on hieman eri alueella käämi-ikkunassa kuin muuntajissa, joissa on käytetty pelkkää Nomex-paperia eristeinä, mikä voi aiheuttaa hieman suuremmat sammumisjännitteet.

7.5 Osittaispurkauksien sammumisjännitteiden keskiarvot

Taulukossa 7.1 on esitetty kaikkien mitattujen muuntajien sammumisjännitteiden keskiarvot luvuissa 7.2–7.4 käsitellyille käämiväleille vaihtojännitteen huippuarvona.

Taulukko 7.1. Mitattujen osittaispurkauksien sammumisjännitteiden keskiarvo.

Osittaispurkauksien sammumisjännitteiden keskiarvo (p.u)			
Eristysrakenne	Käämiväli N1-N3	Käämiväli N2-N3	Käämiväli N4-N3
Nomex	1,01	0,96	0,89
Nomex, rajausteippi	1,09	1,06	1,01
Nomex, suikaleet	1,13	0,89	0,97
Mylar, rajausteippi	1,00	1,27	1,38

Taulukossa 7.1 muuntajien, joissa on käytetty Nomex-paperia ja rajausteippiä eristysrakenteessa, sammumisjännitteiden keskiarvo on pienempi käämivälillä N1-N3 kuin muuntajien, joissa on käytetty Nomex-paperia ja Nomex-suikaleita eristysrakenteessa. Kyseisten muuntajien sammumisjännitteiden keskiarvot olisivat hyvin lähellä toisiaan, jos keskiarvon laskennasta poistettaisiin muuntajan numero viisi, jossa on käytetty Nomex-paperia ja rajausteippiä eristysrakenteessa, koska muuntajan pieni sammumisjännite johtui siitä, että rajausteippi ei ollut suunnitellussa kohdassa.

Käämiväleillä N2-N3 ja N4-N3 suurimmat sammumisjännitteiden keskiarvot ovat muuntajilla, joissa on käytetty Mylar-kalvoa ja rajausteippiä eristysrakenteessa. Käämivälillä N2-N3 muuntajien, joissa on käytetty Nomex-paperia ja Nomex-suikaleita eristysrakenteessa, sammumisjännitteiden keskiarvoa laskee huomattavasti muuntajan numero seitsemän sammumisjännite, joka oli muita kyseisen eristysrakenteen muuntajia huomattavasti pienempi.

8 YHTEENVETO

Työssä tutkittiin flyback-muuntajan eristysrakennetta ja eristemateriaaleja. Tutkimuksen tarkoituksena oli löytää mahdollisimman hyvä eristysrakennerratkaisu osittaispurkauksien syttymis- ja sammumisjännitteiden kannalta.

Työn teoriaosuudessa käsiteltiin flyback-hakkurin toimintaa, jotta voitiin ymmärtää flyback-muuntajassa esiintyviä ilmiöitä ja muuntajan rakennetta. Tämän lisäksi teoriaosuudessa käsiteltiin myös osittaispurkauksia, jotta osittaispurkauksien mahdollisia syttymispaikkoja voitiin tunnistaa muuntajan eristysrakenteesta. Teoriaosuuksien pohjalta käsiteltävälle flyback-muuntajalle valittiin tutkittava käämintäkonfiguraatio sekä eristekerroksien paksuudet, jonka jälkeen muuntajalle tehtiin kaksiulotteinen simulointimalli Ansysksen Maxwell 2014 ohjelmalla.

Simulointien pohjalta pystyttiin toteamaan muuntajan eristysrakenteessa esiintyvien kentänvoimakkuuksien muuttuvan aiemmin käsitellyn sähkökenttien teorian mukaisesti. Valitussa muuntajan käämintäkonfiguraatiossa huomattiin olevan mahdollista, että eristysrakenteessa voi esiintyä muuntajan ensiökäämien ja toisiokäämien välillä niin sanottuja käämien leikkauskohtia, joissa käämien välille jää eristeeksi johdinten pinnalla olevan eristeen lisäksi ainoastaan ilmaa tai pahimmassa tapauksessa käämit pystyivät koskettamaan toisiaan kiinteän eristeen puuttuessa johdinten välistä. Löydetyn käämien leikkauskohdan arveltiin olevan osittaispurkauksien syttymiskohta ensiö- ja toisiokäämien välisissä mittauksissa. Tämän perusteella simulointiin mahdollisia lisäeristeratkaisuja, joilla estetään pelkästään ilman jääminen eristeeksi kyseisten käämien välille niiden leikkauskohdassa.

Simulointitulosten perusteella valmistettiin neljällä erilaisella eristysrakenteella olevia muuntajaprototyyppejä. Kahteen eristysrakennerratkaisuun valittiin käämien väliseksi eristeeksi Nomex 411 -paperia ja ensiökäämien leikkauskohtaan laitettiin eristeeksi joko Nomex 411 -paperisuikaleet tai 1 mm levyinen rajausteippi. Kolmanteen eristysrakennerratkaisuun valittiin käämien väliseksi eristeeksi Mylar-kalvoa ja ensiökäämien leikkauskohtaan laitettiin eristeeksi 1 mm levyinen rajausteippi. Neljänneksi eristysrakennerratkaisuksi valittiin eristysrakenne, jossa käämien välisenä eristeenä oli vain Nomex 411 -paperia ja käämien leikkauskohdassa ei ollut kiinteää eristettä. Lisäksi kaikki muuntajat oli kastettu lakkaan valmistuksen jälkeen.

Kaikille neljälle eristysrakennerratkaisulle tehtiin osittaispurkaustesti, ja mitattuja sammumisjännitteitä verrattiin eristysrakennerratkaisujen kesken. Mittaustulokset tukivat pääosin hyvin sitä teoriaa, että osittaispurkaukset syttyisivät ensiökäämien ja toisiokäämien välisissä leikkauskohdissa kyseisten käämien välisissä mittauksissa. Sammumisjännitteet eivät nousseet kuitenkaan odotetun paljon muuntajilla, joissa oli käytetty eristeenä Nomex 411 -paperia ja ensiökäämien leikkauskohtaan oli laitettu eristeeksi joko Nomex 411 -paperisuikaleet tai 1 mm levyinen rajausteippi. Tämä saattoi johtua siitä, että lakka ei ollut imeytynyt hyvin Nomex 411 -paperiin, minkä vuoksi

eristysrakenteeseen jäi runsaasti ilmakuplia. Tällöin osittaispurkauksien sammumisjännite käämien välisen eristeen yli saattoi olla vain hieman suurempi kuin käämien leikkauskohdan välisten osittaispurkauksien sammumisjännite. Muuntajissa, joissa oli käytetty Mylar-kalvoa eristeenä, oli keskimäärin suurempi sammumisjännite kuin muilla eristysrakenneratkaisulla. Tämä johtui todennäköisesti lakan hyvästä tunkeutumisesta eristysrakenteeseen alimpia eristekerroksia lukuun ottamatta, joihin lakka oli tunkeutunut huonommin.

Jatkossa flyback-muuntajan eristysrakenteen osittaispurkauksien syttymis- ja sammumisjännitettä voidaan edelleen pyrkiä kasvattamaan parantamalla lakan tunkeutumista eristysrakenteeseen. Lakan tunkeutuminen eristysrakenteeseen voi parantua esimerkiksi korvaamalla muuntajien lakkaan kastaminen tyhjiössä tapahtuvaan lakalla kyllästämiseen tai etsimällä erilainen lakka, joka tunkeutuu paremmin eristysrakenteeseen. Tällöin muuntajissa, joissa on käytetty Mylar-kalvoa eristeenä, lakka voi tunkeutua hyvin myös alimpiin eristekerroksiin, jolloin mahdollisesti myös alimman käämivälin osittaispurkauksien syttymis- ja sammumisjännitteet nousisivat.

LÄHTEET

- [1] IEC Standard 61800-5-1. Adjustable speed electrical power drive systems, Part 5-1: Safety requirements – Electrical, thermal and energy. Edition 2. 2007, International Electrotechnical Commission.
- [2] Tel-1360 sähkömoottorikäytöt. 2011, Tampereen teknillinen yliopisto. Luentomoniste.
- [3] Wilson, T.G. The Evolution of Power Electronics. IEEE transactions on power electronics. Vol. 15. 2000. pp. 439–446
- [4] Neil Storey. Electronics: a system approach. 1998, Pearson Education Limited. 688 p.
- [5] TEL-1040 Tasasuuntaajat. 2009, Tampereen teknillinen yliopisto. Luentomateriaali.
- [6] TEL-1120 Vaihtosuuntaajat. 2012, Tampereen teknillinen yliopisto. Luentomateriaali.
- [7] Mohan, N., Undeland, T.M. & Robbins, W.P. Power electronics: Converters, Applications, and Design. 3rd Edition. 2003, John Wiley & Sons, Inc. 802 p.
- [8] Erickson, R.W. DC–DC Power Converters. 2007, Wiley Encyclopedia of Electrical and Electronics Engineering.
- [9] Iftikhar, M.U., Sadarnac, D. & Karimi, C. Conducted EMI Suppression and Stability Issues in Switch-mode DC-DC Converters. 2006, IEEE. pp. 389–394.
- [10] Indidan Institue of Technology Kharagpur. Power Electronics, Module 3. [WWW]. [Viitattu 17.1.2014]. Saatavissa: http://nptel.ac.in/courses/Webcourse-contents/IIT%20Kharagpur/Power%20Electronics/New_index1.html.
- [11] Christophe P. Basso. Switch-mode power supplies: SPICE simulations and practical designs. 2008, The McGraw-Hill Companies, Inc. 889 p.

- [12] Hren, A., Korelic, J. & Milanovic, M. RC-RCD clamp circuit for ringing losses reduction in a flyback converter. *Circuits and Systems II: Express Briefs*. 2006, IEEE Transactions on (Volume: 53, Issue: 5). pp. 369–373.
- [13] Havunen, J. Flyback-muuntajan simulointimallin luominen impedanssimittauksia käyttäen. Diplomityö. 2013. Tampereen teknillinen yliopisto. 65 s.
- [14] Picard, J. Under the Hood of Flyback SMPS Designs. Texas Instruments. Power Supply Design Seminar 2010. 41 p.
- [15] Marty Brown. Power Supply Cookbook. 2001, Newnes. 280 p.
- [16] Aro, Elovaara, Karttunen, Nousiainen & Palva. Suurjännitetekniikka. 2. painos. 2003, Otatieto. 520 s.
- [17] BL20A0300 Suurjännitetekniikka. 2013, Lappeenrannan teknillinen yliopisto. Luentomateriaali.
- [18] Kuffel, E., Zaengl, W.S. & Kuffel, J. High Voltage Engineering Fundamentals. Second edition. 2000, Elsevier. 539 p.
- [19] Paoletti, G. & Golubev, A. Partial Discharge Theory and Applications to Electrical Systems. Pulp and Paper Industry Conference in Seattle. 21–25 June 1999. pp. 214–138.
- [20] Kreuger, F.H. Partial discharge detection high voltage equipment. 1989, Butterworth & Co. 193 p.
- [21] IEEE Guide for Making Corona (Partial Discharge) Measurements on Electronics Transformers. 1991, IEEE. 16 p.
- [22] Rinne, T. Metalloitujen ohutkalvokondensaattoreiden ominaisuudet tasajännitteellä. Diplomityö. 2011. Tampereen teknillinen yliopisto. 83 s.
- [23] IEC Standard 60270. High-voltage test techniques, Partial discharge measurements. Edition 3. 2000, International Electrotechnical Commission.
- [24] Furukawa Electric, Standard Type TEX-E. [WWW]. [Viitattu 18.3.2014]. Saatavissa:
http://www.furukawa.co.jp/makisen/eng/product/texte_series.htm

- [25] Furukawa Electric, Litz Type TEX-ELZ. [WWW]. [Viitattu 18.3.2014]. Saatavissa: <http://www.furukawa.co.jp/makisen/eng/product/texelz.htm>
- [26] IEC Standard 60317-0-1. Specifications for particular types of winding wires, Part 0-1: General requirements – Enamelled round copper wire. Edition 4.0. 2013, International Electrotechnical Commission.
- [27] 3M. 3M Insulating and Conductive Tapes, Trusted Performance from the tape experts. Product Selection Guide.
- [28] Dupont. NOMEX paper type 410. 2013. Technical data sheet. 6 p.
- [29] Dupont. NOMEX type 411. 2003. Technical data sheet. 2 p.
- [30] Dupont. Mylar. 2003. Technical data sheet. 8 p.
- [31] ANSYS Maxwell. [WWW]. [Viitattu 6.6.2014]. Saatavissa: <http://www.ansys.com/Products/Simulation+Technology/Electronics/Electromechanical/ANSYS+Maxwell>
- [32] ANSYS. Lecture 1: Introduction to ANSYS Maxwell. ANSYS Maxwell V16 Training Manual. [WWW]. [Viitattu 6.6.2014]. Saatavissa: http://ansoft-maxwell.narod.ru/en/Maxwell_v16_L01_Introduction.pdf
- [33] IEC Standard 60664-1. Insulation coordination for equipment within low-voltage systems, Part 1: Principles, requirements and tests. Edition 2. 2007, International Electrotechnical Commission.

LIITE A: FURUKAWAN TEX-E JOHTIMEN MITAT ERI JOHTIMEN HALKAISIJOILLE

Taulukko A.1. Furukawan TEX-E johtimen mitat eri johtimen halkaisijoille [24].

Tyypillinen johtimen halkaisija (mm)	Toleranssi (mm)	Tyypillinen kokonaishalkaisija (mm)	Suurin kokonaishalkaisija (mm)	Suurin johtimen resistanssi (Ω/km)
0,20	$\pm 0,008$	0,400	0,417	607,6
0,21	$\pm 0,008$	0,410	0,427	549,0
0,22	$\pm 0,008$	0,420	0,437	498,4
0,23	$\pm 0,008$	0,430	0,447	454,5
0,24	$\pm 0,008$	0,440	0,457	416,2
0,25	$\pm 0,008$	0,450	0,467	382,5
0,26	$\pm 0,010$	0,460	0,477	358,4
0,27	$\pm 0,010$	0,470	0,487	331,4
0,28	$\pm 0,010$	0,480	0,497	307,3
0,29	$\pm 0,010$	0,490	0,507	285,7
0,30	$\pm 0,010$	0,500	0,520	262,9
0,32	$\pm 0,010$	0,520	0,540	230,3
0,35	$\pm 0,010$	0,550	0,570	191,2
0,37	$\pm 0,010$	0,570	0,590	170,6
0,40	$\pm 0,010$	0,600	0,625	145,3
0,45	$\pm 0,010$	0,650	0,675	114,2
0,50	$\pm 0,010$	0,700	0,725	91,43
0,55	$\pm 0,020$	0,750	0,775	78,15
0,60	$\pm 0,020$	0,800	0,825	65,26
0,65	$\pm 0,020$	0,850	0,875	55,31
0,70	$\pm 0,020$	0,900	0,925	47,47
0,75	$\pm 0,020$	0,950	0,975	41,19
0,80	$\pm 0,020$	1,000	1,030	36,08
0,85	$\pm 0,020$	1,050	1,080	31,87
0,90	$\pm 0,020$	1,100	1,130	28,35
0,95	$\pm 0,020$	1,150	1,180	25,38
1,00	$\pm 0,030$	1,200	1,230	23,33

LIITE B: FURUKAWAN TEX-ELZ JOHTIMEN MITAT ERI JOHTIMEN HALKAISIJOILLE

Taulukko B.1. Furukawan TEX-ELZ johtimen mitat eri johtimen halkaisijoille [25].

Tyypillinen johtimen halkaisija (mm)	Tyypillinen kokonaishalkaisija (mm)	Suurin kokonaishalkaisija (mm)	Suurin johtimen resistanssi (Ω/km)
7/0,10	0,522	0,562	346,9
7/0,11	0,552	0,592	285,2
7/0,12	0,588	0,628	238,4
7/0,13	0,618	0,658	202,4
7/0,14	0,648	0,688	173,8
7/0,15	0,678	0,718	151,1
7/0,16	0,714	0,754	132,4
7/0,17	0,744	0,784	117,0
7/0,18	0,774	0,814	104,2
7/0,19	0,804	0,844	93,34
7/0,20	0,834	0,874	84,10
7/0,21	0,864	0,904	76,18
7/0,22	0,894	0,934	69,96
7/0,23	0,930	0,970	63,91
7/0,24	0,960	1,000	58,61
7/0,25	0,990	1,030	53,94
7/0,26	1,020	1,060	49,81
7/0,27	1,050	1,090	46,13
7/0,28	1,080	1,120	42,85
7/0,29	1,110	1,150	39,91
7/0,30	1,146	1,186	37,01

LIITE C: LAKATUN KUPARIJOHTIMEN ERISTEKERROKSEN PAKSUUS ERI JOHTIMEN HALKAISIJOILLE

Taulukko C.1. Lakatun kuparijohtimen eristekerroksen paksuus eri johtimen halkaisijoille [26].

Tyypillinen johtimen halkaisija (mm)	Toleranssi \pm (mm)	Eristeen aiheuttama halkaisijan vähimmäiskasvu (mm)			Suurin kokonaishalkaisija (mm)		
		Luokka 1	Luokka 2	Luokka 3	Luokka 1	Luokka 2	Luokka 3
0,019		0,002	0,004	0,007	0,023	0,026	0,028
0,021		0,002	0,004	0,007	0,026	0,028	0,031
0,024		0,002	0,005	0,008	0,029	0,032	0,035
0,027		0,003	0,005	0,009	0,033	0,036	0,04
0,03		0,003	0,006	0,009	0,037	0,041	0,044
0,034		0,003	0,006	0,01	0,041	0,046	0,05
0,038		0,004	0,008	0,011	0,046	0,051	0,055
0,043		0,004	0,009	0,012	0,052	0,058	0,063
0,048		0,005	0,01	0,014	0,059	0,064	0,069
0,053		0,005	0,01	0,015	0,064	0,07	0,076
0,06		0,006	0,011	0,016	0,072	0,079	0,085
0,067	0,003	0,007	0,012	0,018	0,08	0,088	0,095
0,075	0,003	0,007	0,013	0,02	0,089	0,095	0,102
0,085	0,003	0,008	0,014	0,021	0,1	0,107	0,114
0,095	0,003	0,008	0,016	0,023	0,111	0,119	0,126
0,106	0,003	0,009	0,017	0,026	0,123	0,132	0,14
0,118	0,003	0,01	0,019	0,028	0,136	0,145	0,154
0,132	0,003	0,011	0,021	0,03	0,152	0,162	0,171
0,15	0,003	0,012	0,023	0,033	0,171	0,182	0,193
0,17	0,003	0,013	0,025	0,036	0,194	0,205	0,217
0,19	0,003	0,014	0,027	0,039	0,216	0,228	0,24
0,212	0,003	0,015	0,029	0,043	0,24	0,254	0,268
0,236	0,004	0,017	0,032	0,048	0,267	0,283	0,298
0,265	0,004	0,018	0,033	0,05	0,297	0,314	0,33
0,3	0,004	0,019	0,035	0,053	0,334	0,352	0,36
0,335	0,004	0,02	0,038	0,057	0,372	0,391	0,408
0,375	0,005	0,021	0,04	0,06	0,414	0,434	0,453
0,425	0,005	0,022	0,042	0,064	0,466	0,488	0,508
0,475	0,005	0,024	0,045	0,067	0,519	0,541	0,562
0,53	0,006	0,025	0,047	0,071	0,576	0,6	0,623
0,6	0,006	0,027	0,05	0,075	0,649	0,674	0,698
0,67	0,007	0,028	0,053	0,08	0,722	0,749	0,774
0,75	0,008	0,03	0,056	0,085	0,805	0,834	0,861
0,85	0,009	0,032	0,06	0,09	0,909	0,939	0,968
0,95	0,01	0,034	0,063	0,095	1,012	1,044	1,074

Taulukko C.2. Lakatun kuparijohtimen eristekerroksen paksuus eri johtimen halkaisijoille [26].

Tyypillinen johtimen halkaisija (mm)	Toleranssi \pm (mm)	Eristeen aiheuttama halkaisijan vähimmäiskasvu (mm)			Suurin kokonaishalkaisija (mm)		
		Luokka 1	Luokka 2	Luokka 3	Luokka 1	Luokka 2	Luokka 3
1,06	0,011	0,034	0,065	0,098	1,124	1,157	1,188
1,18	0,012	0,035	0,067	0,1	1,246	1,279	1,311
1,32	0,013	0,036	0,069	0,103	1,388	1,422	1,455
1,5	0,015	0,038	0,071	0,107	1,57	1,606	1,64
1,7	0,017	0,039	0,073	0,11	1,772	1,809	1,844
1,9	0,019	0,04	0,075	0,113	1,974	2,012	2,048
2,12	0,021	0,041	0,077	0,116	2,196	2,235	2,272
2,36	0,024	0,042	0,079	0,119	2,438	2,478	2,516
2,65	0,027	0,043	0,081	0,123	2,73	2,772	2,811
3	0,03	0,045	0,084	0,127	3,083	3,126	3,166
3,35	0,034	0,046	0,086	0,13	3,435	3,479	3,521
3,75	0,038	0,047	0,089	0,134	3,838	3,883	3,926
4,25	0,043	0,049	0,092	0,138	4,341	4,387	4,431
4,75	0,048	0,05	0,094	0,142	4,843	4,891	4,936